



Faculté de génie

Département de génie civil

**EFFET DES CARACTÉRISTIQUES
PHYSICO-CHIMIQUES DES AJOUTS MINÉRAUX
SUR LES PROPRIÉTÉS RHÉOLOGIQUES DES
MORTIERS DE BÉTONS FLUIDES ÉQUIVALENTS**

Thèse de doctorat ès sciences appliquées

Spécialité : génie civil

Fahima Rouis

Sherbrooke (Québec), Canada

Mai 2017

RÉSUMÉ

La vitesse à laquelle le monde actuel fonctionne a des répercussions directes sur tout ce qui nous entoure et, en premier plan, sur le marché de la construction dont les critères sont de plus en plus exigeants tels que les courts délais de construction, la complexité des formes, etc. L'utilisation des bétons fluides dont les propriétés rhéologiques sont bien maîtrisées est une clé pour satisfaire à ces critères, d'autant plus qu'on se trouve au seuil d'une nouvelle ère dans le monde de la construction incluant l'impression 3D des bétons. Cependant, une sélection adéquate des ajouts minéraux (AM) et des adjuvants chimiques (superplastifiants, SP et agents de viscosité, AV) qui entrent dans la conception des bétons fluides s'avère un problème crucial.

Un programme expérimental très étendu est mené pour mettre la lumière sur l'effet de huit différents AM dans des systèmes binaires et ternaires ainsi que l'effet de leurs interactions avec les adjuvants chimiques (SP et AV) sur les propriétés des mortiers de bétons équivalents (MBE). Deux classes de bétons fluides sont visées dans cette étude comprenant les bétons autoplaçants (BAP) pour la construction des bâtiments et les bétons semi-fluides (BSF) pour les infrastructures de transport. Une attention particulière est portée sur les propriétés rhéologiques, sans pour autant négliger la chaleur d'hydratation ainsi que les propriétés mécaniques.

Les résultats ont montré qu'il est difficile de faire une généralisation sur l'influence des AM sur les propriétés des MBE. Les propriétés physiques des AM telles que la finesse, la forme ou encore la granulométrie des particules sont des facteurs qui jouent un rôle important dans la rhéologie des bétons fluides. Cependant, l'influence de ces facteurs peut être masquée par l'interaction physique et chimique qui peut avoir lieu entre les poudres et les adjuvants chimiques utilisés (type de SP en présence de ou sans AV compatibles). La morphologie des particules des AM a un effet direct sur la viscosité plastique des MBE. Une forme angulaire et irrégulière (facteur de Ferret autour de 0,4), contribue à augmenter la viscosité plastique des MBE et une forme sphérique (facteur de Ferret proche de 1) contribue à diminuer leur viscosité plastique.

Par ailleurs, les résultats de l'analyse statistique ont montré que l'influence des AM en combinaison ternaire (une poudre à faible réactivité avec une poudre à réactivité élevée), en présence d'un rapport eau/poudres (E/P) relativement élevé (0,45), sur la majorité des réponses n'est que la somme des effets individuels de ces poudres. Par contre, un effet d'interaction entre les poudres pour certaines réponses a commencé légèrement à prendre place lorsque le rapport E/P est diminué à 0,41. Cependant, dans le développement des résistances à la compression à 28 et 91 jours, les poudres à réactivité élevée comme la fumée de silice ou le métakaolin avaient généralement une contribution positive plus importante que celle des poudres à faible réactivité. Les résultats de l'hydratation des MBE ternaires, suivie par la calorimétrie isotherme, n'ont pas montré l'effet synergétique escompté de la combinaison d'une poudre à faible réactivité avec une autre à réactivité élevée dû à l'augmentation de la demande en SP en présence de cette dernière.

Une optimisation multiparamétrique a permis de sélectionner des ciments ternaires servis au développement des bétons écologiques présentant les meilleures performances. Finalement, l'utilité de la méthode des MBE dans la prédiction de l'effet des AM sur les bétons a été discutée.

MOTS CLÉS :

Agent de viscosité, ajout minéral, béton fluide, cinétique d'hydratation, compacité, mortier de béton équivalent, propriété rhéologique, stabilité, superplastifiant.

ABSTRACT

The speed with which the world operates today has direct repercussions on everything around us and, in the foreground, on the construction market, where the criteria are more and more demanding such as short construction times, complexity of forms, etc. The use of fluid concretes where rheological properties are well controlled is a key to satisfy these criteria, especially since we are on the threshold of a new era in the construction world including the 3D concrete printing. However, an adequate selection of mineral additives (MA) and chemical admixtures (superplasticizers, SP and viscosity agents, VA) that are used in the design of fluid concretes is a crucial problem.

A very extensive experimental program is conducted to shed light on the effect of eight different MA in binary and ternary systems as well as the effect of their interactions with the chemical admixtures (SP and VA) on the properties of concrete equivalent mortars (CEM). Two classes of fluid concretes are investigated in this study, including self-consolidating concrete (SCC) for building constructions and semi-flowable concrete (SFC) for transportation infrastructures. Particular attention is paid to the rheological properties, without neglecting the heat of hydration as well as the mechanical properties.

The results showed that it is difficult to generalize on the influence of MA on the properties of CEM. The physical properties of MAs such as fineness, shape or particle size distribution are factors that play an important role in the rheology of fluid concretes. However, the influence of these factors can be masked by the physical and chemical interaction that may occur between the powders and the chemical admixtures used (type of SP in the presence or not of a compatible VA). The particle morphology of MA has a direct effect on the plastic viscosity of CEM. An angular and irregular shape (Ferret factor around 0.4) contributes to increase the plastic viscosity of CEM and a spherical shape (Ferret factor close to 1) contributes to decrease their plastic viscosity.

Moreover, the results of the statistical analysis showed that the influence of MA in ternary combination (low-reactivity powder with high-reactivity powder), in the presence of a relatively high water-to-powder ratio (W/P) of 0.45, on the majority of responses is only the sum of the individual effects of these powders. On the other hand, an interaction effect

between the powders for some responses began slightly when the W/P was decreased to 0.41. However, in developing 28- and 91-day compressive strengths, high-reactivity powders such as silica fume or metakaolin generally had positive contribution higher than low-reactivity powders. Results of ternary CEM hydration followed by isothermal calorimetry did not show the expected synergistic effect of combining a low-reactivity powder with another with high reactivity due to increased demand in SP in the presence of the latter.

A multiparametric optimization allowed selection of ternary cements used to develop ecological concretes with the best performance. Finally, the use of the CEM method in prediction of the effect of AM on concrete was discussed.

KEYWORDS:

Viscosity agent, mineral additive, fluid concrete, hydration kinetics, compacity, concrete equivalent mortar, rheological property, stability, superplasticizer.

REMERCIEMENTS

Ce travail a été réalisé dans le cadre de la « chaire industrielle de recherche sur les bétons fluides à rhéologie adaptée à haute performance », du professeur Kamal Henri Khayat, financée par l'Université de Sherbrooke, le CRSNG « Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada » et 17 partenaires industriels impliqués dans le programme de cette chaire.

Mes remerciements les plus sincères vont à mon directeur de thèse professeur Kamal Henri Khayat, pour sa grande patience, ces encouragements, son financement et son grand degré de professionnalisme. Ceux-ci m'ont beaucoup aidé à compléter ce projet qui me tenait tant à cœur.

Je remercie les partenaires industriels (Association Canadienne du Ciment (Ciment Québec, Lafarge Canada, et St-Lawrence Cement), Euclid Canada, exp, Grace, Groupe SM International, Handy Chemicals, Holcim, Hydro-Québec, Inspec-sol, Laboratoires ABS, Laboratoires Shermont, LVM-Technisol, Ministère des Transports du Québec, Omya Canada, Qualitas, Saramac, Sika Canada, SNC-Lavalin, et Ville de Montréal) qui nous ont donné l'opportunité de faire des recherches poussées pour les différents aspects des bétons fluides à rhéologie adaptée à haute performance.

Mes vifs remerciements vont aux membres de jury : Prof. Ammar Yahia, Prof. Richard Gagné, Dr Pierre-Claver Nkinamubanzi, et Dr Olivier Bonneau qui ont accepté d'évaluer ce modeste travail.

Je tiens à remercier toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce projet, dont je nomme : Nicolas Micanovic, ancien assistant de recherche à l'UdeS, pour sa collaboration durant les premiers 2 ans et demi de ce travail, Mme Guylain Luc pour son assistance lors de la caractérisation des matériaux, M. Stéphane Gutierrez pour son encadrement lors de mon passage au centre de caractérisation des matériaux (CCM) de l'Université de Sherbrooke, Dr David Herbec pour la démonstration sur l'utilisation du MEB du département du génie civil, Ms Rajko Vojnovic et Denis Bolduc pour leur aide durant la phase sur les bétons, le professeur Carmel Jolicoeur de m'avoir donné l'opportunité

d'effectuer certains essais dans son laboratoire y compris les essais de densité et les extraits secs des adjuvants chimiques pour chaque nouveau arrivage, M. Jeff Sherman pour son encadrement lors des essais de conductivité électrique, ainsi que Mme Thi Cong To pour sa supervision lors des essais de potentiel zêta. Je termine par le professeur Nicolas Abatzoglou pour m'avoir facilité l'accès à son équipement acoustique pour la caractérisation granulométrique des poudres fines.

Je remercie ma famille sœurs et frères, en particulier ma mère qu'en dépit de son éloignement, son âge et sa santé n'a pas cessé de m'encourager et de demander des nouvelles à chaque étape. À la mémoire de mon père. Une pensée particulière va à ce que j'ai de plus précieux, mon mari et mes enfants dont j'étais, tant de bien que de mal, présente et attentionnée à leurs demandes tout au long de ce travail et dont nullement ce dernier n'a affecté leurs progrès et leur épanouissement.

Je n'oublie pas de terminer mes remerciements à mes amies proches qui se reconnaîtront certainement, Bien à vous tous!

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ	i
ABSTRACT	iii
TABLE DES MATIÈRES.....	vii
LISTE DES FIGURES	xiii
LISTE DES TABLEAUX	xxiv
LISTE DES NOMENCLATURES	xxvii
CHAPITRE 1 : INTRODUCTION.....	1
CHAPITRE 2 : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE	5
2.1 INTRODUCTION.....	5
2.2 CARACTÉRISTIQUES ET HYDRATATION DU CIMENT PORTLAND	6
2.6.1 Composition du ciment portland	6
2.6.2 Hydratation des phases du ciment portland.....	8
2.6.2.1 Hydratation des silicates	8
2.6.2.2 Hydratation des aluminates.....	9
2.6.2.3 Hydratation du ciment portland	9
2.3 L'hydratation en présence des ajouts minéraux	12
2.4 Interêt des ciments ternaires	15
2.5 CONCEPTS FONDAMENTAUX EN RHÉOLOGIE.....	15
2.5.1 Comportements rhéologiques.....	16
2.5.2 Grandeurs rhéologiques.....	18
2.5.2.1 Seuil de cisaillement	18
2.5.2.2 Viscosité	19
2.5.3 Corrélations entre les grandeurs rhéologiques et les essais empiriques	20
2.5.4 Thixotropie et anti-thixotropie	21
2.5.5 Rhéométrie	22
2.5.5.1 Phénomènes perturbateurs	23
2.5.5.2 Géométries de mesures	25
2.6 EFFET DES AM SUR PROPRIÉTÉS RHÉOLOGIQUES	28
2.6.1 La cendre volante	28
2.6.2 La fumée de silice.....	31
2.6.3 Le laitier de haut fourneau.....	32
2.6.4 Les ciments ternaire.....	34
2.7 ADJUVANTS CHIMIQUES ET LEURS INTERCATIONS AVEC LE CIMENT	37

2.7.1 Les superplastifiants	37
2.7.1.1 Adsorption des SP	39
2.7.1.2 Les propriétés rhéologiques en présence des SP	42
2.7.2 Effet des agents de viscosité.....	44
2.7.2.1 Adsorption des AV	47
2.7.2.2 Les propriétés rhéologiques en présence des AV	48
2.8 AUTRES PARAMÈTRES INFLUENÇANT LA RHÉOLOGIE	49
2.8.1 Effet du malaxage.....	49
2.8.2 Effet du temps	50
2.9 SYNTHÈSE	50

CHAPITRE 3 : OBJECTIFS, PROGRAMME EXPÉRIMENTAL ET PROCÉDURE

D'ESSAIS 52

3.1 INTRODUCTION	52
3.2 OBJECTIFS DE LA RECHERCHE	53
3.3 MÉTHODOLOGIE	53
3.4 ESSAIS DE CARACTÉRISATION	60
3.4.1 Essais de caractérisation des poudres	61
3.4.1.1 Fluorescence X	61
3.4.1.2 Diffraction des rayons X.....	61
3.4.1.3 Microscope électronique à balayage.....	61
3.4.1.4 Granulométrie laser	62
3.4.1.5 Finesse Blaine.....	62
3.4.2 Caractérisation des MBE.....	63
3.4.2.1 Méthode du mortier de béton équivalent (MBE).....	63
3.4.2.2 La séquence de malaxage des MBE	64
3.4.2.3 Essai du mini cône	65
3.4.2.4 Entonnoir en V (V-funnel).....	65
3.4.2.5 Teneur en air	65
3.4.2.6 Viscosimètre ConTec 6.....	66
3.4.2.7 Ressuage forcé	67
3.4.2.8 Conductivité électrique.....	69
3.4.2.9 Calorimétrie	70
3.4.2.10 Répétabilité des essais de calorimétrie	71
3.4.2.11 Conservation des échantillons	73
3.4.2.12 Résistance à la compression	74
3.4.2.13 Répétabilité des essais de caractérisation	74
3.4.3 Caractérisation des bétons	75
3.4.3.1 Séquence de malaxage des bétons	75

3.4.3.2	Étalement, t_{50} (ou t_{40}) et indice visuel de stabilité	76
3.4.3.3	J-Ring.....	77
3.4.3.4	L-Box et t_{40}	78
3.4.3.5	Teneur en air.....	80
3.4.3.6	Colonne de ségrégation.....	80
3.4.3.7	Viscosimètre ConTec 5.....	81
3.4.3.8	Palettes portatives (thixotropie).....	83
3.4.3.9	Échantillonnage et mûrissement des échantillons	85
3.4.3.10	Résistance à la compression	86
3.4.3.11	Retrait de séchage.....	86
3.4.3.12	Perméabilité aux ions de chlorure.....	87
3.4.3.13	Résistance à l'écaillage.....	87
3.4.3.14	Résistance aux cycles de gel-dégel.....	88
3.5	CONCLUSIONS	89

CHAPITRE 4 : CARACTÉRISATION DES MATÉRIAUX ET MÉLANGES DE RÉFÉRENCE 90

4.1	INTRODUCTION.....	90
4.2	CARACTÉRISATION DES MATÉRIAUX	90
4.2.1	Ciment	92
4.2.2	Cendres volantes.....	94
4.2.3	Laitiers.....	96
4.2.4	Fillers.....	98
4.2.5	Métakaolin.....	100
4.2.6	Fumée de silice.....	101
4.2.7	Sable	102
4.2.8	Gros granulats.....	103
4.2.9	Adjuvants chimiques	105
4.3	Composition des Mélanges de référence.....	105
4.4	Compatibilité et ROBUSTESSE des BAP de référence	109
4.5	Dispositions et mesures entreprises.....	115

CHAPITRE 5 : EFFET DES CIMENTS BINAIRES SUR LES PROPRIÉTÉS DES MBE 116

5.1	INTRODUCTION.....	116
5.2	EFFET DES AM ET DE LA COMBINAISON SP-AV SUR LES PROPRIÉTÉS DES MBE-AP 116	

5.2.1 Effet des AM et de la combinaison SP-AV sur les propriétés rhéologiques et la stabilité des MBE-AP	117
5.2.1.1 Effet sur la fluidité	117
5.2.1.2 Effet sur la viscosité plastique et le temps d'écoulement par l'entonnoir en V ...	122
5.2.1.3 Effet sur la perte de fluidité en fonction du temps.....	126
5.2.1.4 Effet des AM et de la combinaison SP-AV sur la stabilité.....	128
5.2.1.5 Synthèse.....	131
5.2.2 Effet des AM et de la combinaison SP-AV sur l'hydratation et le développement des résistances des MBE-AP.....	132
5.2.2.1 Dégagement de chaleur.....	132
5.2.2.2 Temps de prise.....	148
5.2.2.3 Développement des résistances à la compression	149
5.2.2.4 Synthèse.....	154
5.3 EFFET DES AM ET DU TYPE DE SP SUR LES PROPRIÉTÉS DES MBE-SF	155
5.3.1 Effet des AM et du type de SP sur les propriétés rhéologiques et la stabilité des MBE-SF	156
5.3.1.1 Effet sur la fluidité	156
5.3.1.2 Effet la viscosité plastique et le temps d'écoulement à travers V-funnel.....	159
5.3.1.3 Effet sur la rétention de fluidité	163
5.3.1.4 Effet des AM et du type de SP sur la stabilité des MBE-SF	164
5.3.1.5 Synthèse.....	167
5.3.2 Effet des AM et du type de SP sur l'hydratation et le développement des résistances des MBE-SF.....	167
5.3.2.1 Dégagement de chaleur.....	167
5.3.2.2 Temps de prise.....	179
5.3.2.3 Résistance à la compression	181
5.3.2.4 Synthèse.....	188
5.4 CORRÉLATION ENTRE LES ESSAIS DE FLUIDITÉ ET LES PARAMÈTRES RHÉOLOGIQUES.....	188
5.5 CONCLUSIONS.....	191
CHAPITRE 6 : EFFET DES CARACTÉRISTIQUES DES AJOUTS MINÉRAUX SUR LES PROPRIÉTÉS RHÉOLOGIQUES DES MBE	193
6.1 INTRODUCTION.....	193
6.2 Effet de la surface spécifique des AM et des fillers sur les propriétés rhéologiques des MBE	193
6.3 Effet de la distribution granulométrique des AM et des fillers sur les propriétés rhéologiques des MBE	196

6.4 Effet de la forme des particules des AM et des fillers sur les propriétés rhéologiques des MBE	204
6.5 Effet des AM et des fillers sur la compacité humide des pâtes de ciment	209
6.5.1 Principe de la méthode de compacité humide	211
6.5.2 Méthode de malaxage et procédure de mesure	211
6.5.3 Calcul de la compacité granulaire	213
6.5.4 Optimisation de la compaction	214
6.5.5 Relation entre la compacité granulaire et la consistance de la pâte de ciment	218
6.5.6 Effet des AM et des fillers sur la compacité granulaire humide	220
6.5.7 Relation entre la compacité granulaire avec la surface spécifique et la taille moyenne des AM	226
6.6 Effet des AM et des fillers sur l'interaction ciment-SP avec et sans la présence d'AV	229
6.6.1 Points de saturation des coulis de ciment témoins	230
6.6.2 Point de saturation des ciments binaires en présence de SP seul	232
6.6.3 Point de saturation des ciments binaires en présence de SP-AV	239
6.7 Effet du changement des fractions volumétriques	246
6.8 Conclusions	248

CHAPITRE 7 : EFFET DES CIMENTS TERNAIRES SUR LES PROPRIÉTÉS DES

MBE	252
7.1 Introduction	252
7.2 Plan d'expérience utilisé	253
7.3 Effet des ciments ternaires sur les propriétés des MBE-AP	254
7.3.1 Modèles statistiques dérivés	255
7.3.2 Effet des ciments ternaires sur la demande en SP des MBE-AP	263
7.3.3 Effet des ciments ternaires sur la viscosité plastique des MBE-AP	265
7.3.4 Perte de maniabilité des MBE-AP contenant les ciments ternaires	267
7.3.5 Effet des ciments ternaires sur le ressuage forcé des MBE-AP	268
7.3.6 Effet des ciments ternaires sur le dégagement de chaleur des MBE-AP	270
7.3.7 Effet des ciments ternaires sur le temps de prise des MBE-AP	276
7.3.8 Effet des ciments ternaires sur la résistance à la compression des MBE-AP	277
7.3.9 Synthèse	282
7.4 Effet des ciments ternaires sur les propriétés des MBE-SF	285
7.4.1 Modèles statistiques dérivés	285
7.4.2 Effet des ciments ternaires sur la demande en SP des MBE-SF	295
7.4.3 Effet des ciments ternaires sur la viscosité plastique des MBE-SF	296
7.4.4 Effet des ciments ternaires sur le dégagement de chaleur des MBE-SF	300

7.4.5 Perte de maniabilité des MBE-SF contenant les ciments ternaires	308
7.4.6 Effet des ciments ternaires sur la résistance à la compression des MBE-SF	309
7.4.7 Synthèse.....	314
7.5 Conclusions	316
CHAPITRE 8 : VALIDATION SUR LE BÉTON	320
8.1 Introduction	320
8.2 Optimisation multiparamétrique.....	320
8.3 Validation des ciments ternaires sur bAP pour construction de bâtiments	323
8.3.1 Propriétés des BAP validés à l'état frais	324
8.3.2 Propriétés mécaniques des BAP validés	326
8.3.3 Retrait de séchage des BAP validés	328
8.3.4 Synthèse.....	329
8.4 Validation des Ciments ternaires sur BSF pour Infrastructures de transport	330
8.4.1 Propriétés des BSF pré-validés à l'état frais	332
8.4.2 Propriétés mécaniques des BSF pré-validés.....	337
8.4.3 Retrait de séchage des BSF pré-validés	338
8.4.4 Synthèse.....	339
8.4.5 Durabilité des BSF validés.....	340
8.5 Corrélations entre les résultats des MBE et des bétons correspondants.....	342
8.5.1 Demande en SP	343
8.5.2 Étalement.....	345
8.5.3 Seuil de cisaillement et viscosité plastique	345
8.5.4 Résistance à la compression	349
8.6 Conclusions	351
CHAPITRE 9 : CONCLUSIONS GÉNÉRALES.....	353
9.1 Étude des ciments binaires	353
9.2 Étude des ciments ternaires	357
9.3 Validation sur béton	359
CHAPITRE 10 : RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	361
ANNEXE A (pour chapitre 4)	373

LISTE DES FIGURES

Chapitre 2

Figure 2.1 Illustration du comportement du béton avec : (a) même viscosité et seuils de cisaillement différents, (b) même seuil de cisaillement (τ) et viscosités plastiques (μ_{pl}) différentes, (c) même mesures empiriques et différents seuils de cisaillement et viscosités plastiques [Esping, 2007].....	6
Figure 2.35 Dégagement de chaleur et de l'évolution de la microstructure lors de l'hydratation du ciment [Esping, 2007]	11
Figure 2.36 Hydrates associés aux différentes phases de l'hydratation du ciment [Locker et coll., 1976]	11
Figure 2.2 Lois de comportements élémentaires.....	18
Figure 2.3 Mesure de τ_s	19
Figure 2.4 Mesure de τ_0	19
Figure 2.5 Étalement vs. τ et μ_{pl} [Nielsson et coll., 2003].....	21
Figure 2.6 Corrélations viscosité – T_{50} et viscosité – $T_{V-funnel}$ [Nielsson et coll., 2003]	21
Figure 2.7 Représentation schématique des réponses des matériaux thixotropiques et anti-thixotropiques [Esping, 2007]	22
Figure 2.8 Gradient de vitesse dans une couche cisailée [adapté de Benfill et coll., 2000].....	23
Figure 2.9 Géométries de cisaillement de type Couette [Couarraze et coll., 2000]	27
Figure 2.10 Effet du taux de remplacement massique de la CV sur τ [Szecsy, 1997]	29
Figure 2.11 Effet du taux de remplacement massique de la cendre volante sur μ_{pl}	30
Figure 2.12 Effet du taux de remplacement de la CV sur les propriétés rhéologiques de la pâte de ciment [Park et coll., 2005]	30
Figure 2.13 Effet du taux de remplacement massique de la CV sur τ [Koehler et coll., 2007].....	31
Figure 2.14 Effet du remplacement de la FS sur le comportement rhéologique du béton	32
Figure 2.15 Effet du remplacement de la FS sur le comportement rhéologique du mortier	33
Figure 2.16 Effet du taux de remplacement de la FS sur les propriétés rhéologiques des pâtes de ciment [Park et coll., 2005]	33
Figure 2.17 Effet du taux de remplacement du LHF sur les propriétés rhéologiques des pâtes de ciment [Park et coll., 2005]	34
Figure 2.18 Effet du taux de remplacement massique du LHF sur τ [Koehler et coll., 2007]	35
Figure 2.19 Effet du taux de remplacement massique du LHF sur μ_{pl} [Koehler et coll., 2007]	35
Figure 2.20 Effet de la combinaison "LHF-FS" sur la rhéologie des pâtes de ciment	36
Figure 2.21 Effet de la combinaison "CV-FS" sur la rhéologie des pâtes de ciment	36
Figure 2.22 Représentation schématique de la structure moléculaire du PNS et PCE [Ramachandran et coll., 1998]	38

Figure 2.23 Effet dispersant des superplastifiants [LAFARGE, 2007].....	39
Figure 2.24 Variation du potentiel zêta en fonction du dosage en superplastifiant.....	39
Figure 2.25 Isothermes d'adsorption d'un PNS sur les phases pures de ciment, eau/solide = 0,5 [Ramachandran et coll., 1998]	40
Figure 2.26 Adsorption des ions et des polycarboxylates sur les phases hydratées du ciment	41
Figure 2.27 Relation entre l'étalement et le dosage en eau d'un béton avec et sans SP	43
Figure 2.28 Influence du rapport E/C et du SP-PA sur les propriétés rhéologique du mortier (à 20 °C) [Golaszewski et coll., 2004]	44
Figure 2.29 Influence du rapport E/C et du SP-PNS sur les propriétés rhéologique du mortier (à 20 °C) [Golaszewski et coll., 2004]	44
Figure 2.30 Structure moléculaire de (a) Hydroxypropyle méthyle cellulose; (b) gomme welan	46
Figure 2.31 Illustration schématique des modes d'action des AV [Khayat et coll., 2012]	47
Figure 2.32 Adsorption des AV sur les particules du ciment (E/C = 10) [Khayat et coll., 2012].....	48
Figure 2.33 Stabilité des coulis de ciment en fonction de leur fluidité (E/C = 0,65, dosage constant en SP), tiré de [Khayat et coll., 2012] source de [Mikanovic et coll., 2009]	49
Figure 2.34 Effet déstructurant du malaxage et recomposition structurelle au repos	50

Chapitre 3

Figure 3.1 Illustration du plan expérimental	56
Figure 3.2 Récapitulatif des tests de caractérisation	60
Figure 3.3 Passage du béton au MBE	64
Figure 3.4 a) Malaxeur gros HOBART utilisé pour le malaxage des MBE,.....	66
Figure 3.5 a) Viscosimètre ConTec 6 à cylindres coaxiales pour mortiers,.....	68
Figure 3.6 Dispositif du ressuage forcé.....	68
Figure 3.7 (a) Évolution du ressuage forcé dans le temps d'essais pour quelques mélanges de MBE; (b) corrélation entre les pourcentages d'eau essorée à 2,5 min et à 10 min	69
Figure 3.8 Colonne utilisée pour les mesures de conductivité électrique [Otis, 2000]	70
Figure 3.9 Calorimètre isotherme TAM Air a) vue général, b) vue en coupe montrant la double configuration d'une des huit cellules [TAM Air, 2011].....	71
Figure 3.10 Répétabilité du flux thermique des MBE échantillonnés directement du grand Hobart.....	72
Figure 3.11 Répétabilité du flux thermique des MBE préparés et mélangés manuellement.....	73
Figure 3.12 Essai d'étalement	77
Figure 3.13 Indice visuel de stabilité (VSI) [BASF, 2015].....	77
Figure 3.14 Essai J-Ring (a) avec 16 barres pour BAP et (b) avec 8 barres pour BSF	78
Figure 3.15 Dimensions du L-Box	79

Figure 3.16 Essai de la colonne de ségrégation (a) dispositif, (b) récupération du béton de chaque compartiment, (c) lavage des granulats au tamis 5 mm	81
Figure 3.17 Relation entre l'essai de la colonne de ségrégation et l'essai de la stabilité au tamis [Koehler et coll., 2007]	81
Figure 3.18 Viscosimètre ConTec 5 pour bétons	82
Figure 3.19 a) Paramètres d'entrée dans le logiciel FreshWin, b) Les données de sortie	83
Figure 3.20 Dispositif de l'essai de thixotropie par palettes portatives [Omran et coll., 2011]	84
Figure 3.21 Dimension de l'échantillon utilisé pour l'essai d'écaillage	88

Chapitre 4

Figure 4.1 Granulométrie du ciment, des ajouts minéraux	92
Figure 4.2 Photo des grains de ciment par MEB.....	93
Figure 4.3 Spectre de DRX du ciment GU traité à l'acide salicylique.....	93
Figure 4.4 Photo des grains de cendre volante par MEB (a) CV-F (b) CV-C	94
Figure 4.5 Spectre de DRX de la CV-F.....	95
Figure 4.6 Spectre de DRX de la CV-C	95
Figure 4.7 Morphologie des grains des laitiers par MEB (a) L100 (b) L120.....	97
Figure 4.8 Spectre de DRX L100.....	97
Figure 4.9 Spectre de DRX L120.....	98
Figure 4.10 Photo des grains des fillers par MEB (a) CC35 (b) CC3	99
Figure 4. 11 Spectre de DRX CC35	99
Figure 4.12 Spectre de DRX CC3	100
Figure 4.13 Photo des grains de MK par MEB	100
Figure 4.14 Spectre de DRX du MK.....	101
Figure 4.15 Photo des grains de FS par MEB	102
Figure 4.16 Spectre de DRX de la FS	102
Figure 4.17 Courbe granulométrique typique du sable (fuseau normalisé CSA A23.1-2A).....	103
Figure 4.18 Courbe granulométrique typique de la pierre 5–14 mm	104
Figure 4.19 Définition des consistances étudiées dans le domaine des bétons fluides	106
Figure 4.20 Étalement des MBE vs. celui des bétons correspondants	109
Figure 4.21 Conductivité électrique en fonction du temps pour MBE de référence en présence de....	111
Figure 4.22 Conductivité électrique des MBE de référence.....	112

Chapitre 5

Figure 5.1 Étalement à 10 min des MBE-AP avec différents pourcentage d'AM en présence de PNS-AV1 (SP-AV fixes).....	118
Figure 5.2 Étalement à 10 min des MBE-AP avec différents pourcentages d'AM en présence de PC-AV2 (SP-AV fixes).....	119
Figure 5.3 Seuil de cisaillement à 10 min des MBE-AP avec différents pourcentages d'AM en présence de PNS-AV1 (SP-AV fixes).....	119
Figure 5.4 Seuil de cisaillement des MBE-AP avec différents pourcentages d'AM en présence de PC-AV2 (SP-AV fixes).....	120
Figure 5.5 Temps d'écoulement à travers V-funnel à 10 min des MBE-AP avec différents pourcentages d'AM en présence de PNS-AV1 (SP-AV fixes)	123
Figure 5.6 Temps d'écoulement à travers V-funnel à 10 min des MBE-AP avec différents pourcentages d'AM en présence de PC-AV2 (SP-AV fixes).....	124
Figure 5.7 Viscosité plastique à 10 min des MBE-AP avec différents pourcentages d'AM en présence de PNS-AV1 (SP-AV fixes).....	124
Figure 5.8 Viscosité plastique à 10 min des MBE-AP avec différents pourcentages d'AM en présence de PC-AV2 (SP-AV fixes).....	125
Figure 5.9 Évolution du seuil de cisaillement jusqu'à 60 min pour les taux de remplacement maximaux en AM en présence de a) PNS-AV1, b) PC-AV2	127
Figure 5.10 Évolution de la viscosité plastique jusqu'à 60 min pour les taux de remplacement maximaux en AM et filler en présence de a) PNS-AV1 b) PC-AV2.....	128
Figure 5.11 Effet de du taux de remplacement en AM sur le ressuage forcé des MBE-AP en présence de la combinaison PNS-AV1 (SP-AV fixes)	129
Figure 5.12 Effet de du taux de remplacement en AM sur le ressuage forcé des MBE-AP en présence de la combinaison PC-AV2 (SP-AV fixes).....	130
Figure 5.13 Effet du type du couple SP-AV sur la chaleur dégagée des MBE-AP	133
Figure 5.14 Effet du taux de remplacement de la CV-F sur la chaleur d'hydratation des MBE-AP ...	135
Figure 5.15 Effet du taux de remplacement de la CV-F sur la chaleur d'hydratation des MBE-AP ...	135
Figure 5.16 Effet du taux de remplacement de la CV-C sur la chaleur d'hydratation des MBE-AP...	137
Figure 5.17 Effet du taux de remplacement de la CV-C sur la chaleur d'hydratation des MBE-AP...	137
Figure 5.18 Effet du taux de remplacement de CC35 sur la chaleur d'hydratation des MBE-AP.....	138
Figure 5.19 Effet du taux de remplacement de CC35 sur la chaleur d'hydratation des MBE-AP.....	138
Figure 5.20 Effet du taux de remplacement de CC3 sur la chaleur d'hydratation des MBE-AP.....	140
Figure 5.21 Effet du taux de remplacement de CC3 sur la chaleur d'hydratation des MBE-AP.....	140
Figure 5.22 Effet du taux de remplacement du L100 sur la chaleur d'hydratation des MBE-AP	141
Figure 5.23 Effet du taux de remplacement du L100 sur la chaleur d'hydratation des MBE-AP	141
Figure 5.24 Effet du taux de remplacement du L120 sur la chaleur d'hydratation des MBE-AP	142
Figure 5.25 Effet du taux de remplacement du L120 sur la chaleur d'hydratation des MBE-AP	142
Figure 5.26 Effet du taux de remplacement du MK sur la chaleur d'hydratation des MBE-AP	143
Figure 5.27 Effet du taux de remplacement du MK sur la chaleur d'hydratation des MBE-AP	144
Figure 5.28 Effet du taux de remplacement de la FS sur la chaleur d'hydratation des MBE-AP.....	144
Figure 5.29 Effet du taux de remplacement de la FS sur la chaleur d'hydratation des MBE-AP.....	145

Figure 5.30 Effet du taux de remplacement des AM sur l'intensité du pic du flux de chaleur des MBE-AP.....	146
Figure 5.31 Effet des AM sur le temps de prise des MBE-AP en présence de PNS-AV1 (SP-AV fixes)	148
Figure 5.32 Effet des AM sur le temps de prise des MBE-AP en présence de PC-AV2 (SP-AV fixes)	149
Figure 5.33 Effet des AM sur f'_{cl} en présence de PNS-AV1 (SP-AV fixes)	151
Figure 5.34 Effet des AM sur f'_{cl} en présence de PC-AV1 (SP-AV fixes).....	151
Figure 5.35 Effet des AM et des fillers en présence de PNS-AV1 sur la résistance	152
Figure 5.36 Effet des AM et des fillers en présence de PC-AV2 sur la résistance	153
Figure 5.37 Effet des AM et des fillers en présence de PNS-AV1 sur la résistance	153
Figure 5.38 Effet des AM et des fillers en présence de PC-AV2 sur la résistance	154
Figure 5.39 Étalement à 10 min des MBE-SF avec différents pourcentage d'AM en présence du PNS (SP fixe)	157
Figure 5.40 Étalement à 10 min des MBE-SF avec différents pourcentage d'AM en présence du PC (SP fixe)	158
Figure 5.41 Seuil de cisaillement à 10 min des MBE-SF avec différents pourcentages d'AM en présence du PNS (SP fixe)	158
Figure 5.42 Seuil de cisaillement à 10 min des MBE-SF avec différents pourcentages d'AM en présence du PC (SP fixe).....	159
Figure 5.43 Temps d'écoulement à travers V-funnel à 10 min des MBE-SF avec différents pourcentages d'AM et en présence du PNS (SP fixe).....	160
Figure 5.44 Variation du temps d'écoulement à travers V-funnel des MBE-SF avec différents dosages d'AM et en présence du PC (SP fixe)	161
Figure 5.45 Variation de la viscosité plastique des MBE-SF avec différents dosages d'AM et en présence du PNS (SP fixe)	161
Figure 5.46 Variation de la viscosité plastique des MBE-SF avec différents dosages d'AM et en présence du PC (SP fixe).....	162
Figure 5.47 Évolution de l'étalement jusqu'à 60 min pour différents taux.....	164
Figure 5.48 Effet du taux de remplacement d'AM sur le ressage forcé des MBE-SF en présence de PNS (SP fixe)	166
Figure 5.49 Effet du taux de remplacement d'AM sur le ressage forcé des MBE-SF en présence de PC (SP fixe)	166
Figure 5.50 Effet du type de SP sur la chaleur dégagée des MBE-SF	168
Figure 5.51 Effet du taux de remplacement de la CV-F sur la chaleur d'hydratation des MBE-SF	171
Figure 5.52 Effet du taux de remplacement de la CV-F sur la chaleur d'hydratation des MBE-SF	171
Figure 5.53 Effet du taux de remplacement de la CV-C sur la chaleur d'hydratation des MBE-SF ..	172
Figure 5.54 Effet du taux de remplacement de la CV-C sur la chaleur d'hydratation des MBE-SF ...	172
Figure 5.55 Effet du taux de remplacement du L100 sur la chaleur d'hydratation des MBE-SF	173
Figure 5.56 Effet du taux de remplacement du L100 sur la chaleur d'hydratation des MBE-SF	173
Figure 5.57 Effet du taux de remplacement du L120 sur la chaleur d'hydratation des MBE-SF	174
Figure 5.58 Effet du taux de remplacement du L120 sur la chaleur d'hydratation des MBE-SF	174

Figure 5.59 Effet du taux de remplacement du MK sur la chaleur d'hydratation des MBE-SF	176
Figure 5.60 Effet du taux de remplacement du MK sur la chaleur d'hydratation des MBE-SF	176
Figure 5.61 Effet du taux de remplacement du SF sur la chaleur d'hydratation des MBE-SF	177
Figure 5.62 Effet du taux de remplacement du SF sur la chaleur d'hydratation des MBE-SF	177
Figure 5.63 Effet du taux de remplacement des AM sur l'intensité du pic du flux de chaleur des MBE-SF	179
Figure 5.64 Effet des AM sur le temps de prise des MBE-SF en présence de PNS (SP fixe)	180
Figure 5.65 Effet des AM sur le temps de prise des MBE-SF en présence de PC (SP fixe).....	180
Figure 5.66 Effet des AM sur f'_{c1} en présence de PNS (SP fixe).....	182
Figure 5.67 Effet des AM sur f'_{c1} en présence de PC (SP fixe)	182
Figure 5.68 Évolution de f'_{c1} en fonction de la chaleur dégagée des MBE-AP à 24 h	183
Figure 5.69 Effet des AM sur f'_{c28} en présence de PC (SP fixe)	185
Figure 5.70 Effet des AM sur f'_{c28} en présence de PC (SP fixe)	186
Figure 5.71 Effet des AM sur f'_{c56} en présence de PNS (SP fixe).....	187
Figure 5.72 Effet des AM sur f'_{c56} en présence de PC (SP fixe)	187
Figure 5.73 Représentation de l'étalement en fonction du seuil de cisaillement	189
Figure 5.74 Représentation de l'étalement en fonction de la viscosité plastique.....	190
Figure 5.75 Représentation du temps V-funnel en fonction de la viscosité plastique.....	191

Chapitre 6

Figure 6.1 Relation entre la surface spécifique et le seuil de cisaillement des MBE-AP	194
Figure 6. 2 Relation entre la surface spécifique et le seuil de cisaillement des MBE-SF	194
Figure 6. 3 Relation entre la surface spécifique et la viscosité plastique des MBE-AP.....	195
Figure 6.4 Relation entre la surface spécifique et la viscosité plastique des MBE-SF	195
Figure 6.5 Représentation de la distribution granulométrique réelles et celle obtenues par ajustement non-linéaires du modèle Rosin-Rammler pour 100% ciment	199
Figure 6.6 Représentation de la distribution granulométrique réelles et celle obtenues par ajustement non-linéaires du modèle Rosin-Rammler pour 50% ciment + 50% L120	200
Figure 6.7 Représentation de la distribution granulométrique réelle et celle obtenue par ajustement non-linéaire du modèle Rosin-Rammler pour 93% ciment + 7% MK	200
Figure 6.8 Représentation de la distribution granulométrique réelle et celle obtenue par ajustement non-linéaire du modèle Rosin-Rammler pour 60% ciment + 40% CC3	201
Figure 6.9 Effet de la distribution granulométrique des AM et des fillers.....	202
Figure 6.10 Effet de la distribution granulométrique des AM et des fillers.....	202
Figure 6.11 Effet de la distribution granulométrique des AM sur le seuil de cisaillement des MBE-SF en présence de PNS.....	203
Figure 6.12 Effet de la distribution granulométrique des AM sur le seuil de cisaillement des MBE-SF en présence de PC	203
Figure 6.13 Définition des différents facteurs de formes [Wasterholm, 2006].....	205

Figure 6.14 Échelle de rondeur selon Power (1953) [Hunger, 2010]	205
Figure 6.15 Relation entre la forme des particules et la viscosité plastique des MBE-AP	208
Figure 6.16 Relation entre le facteur de forme des particules et la viscosité plastique des MBE-SF ..	208
Figure 6.17 Relation entre la forme des particules et le seuil de cisaillement des MBE-AP	209
Figure 6.18 Relation entre la forme des particules et le seuil de cisaillement des MBE-SF	209
Figure 6.19 Processus d'agglomération selon l'approche Iveson et coll. (2001)	212
Figure 6.20 Procédure de mesure de la compacité granulaire (a) Préparation du mélange (b) Mesure de la masse (c) Mesure de la consistance	213
Figure 6.21 Proportion des vides en fonction du rapport volumique E/P	214
Figure 6.22 Effet du mode de compaction sur la proportion des vides	217
Figure 6.23 Optimisation du temps de vibration avec une couche de remplissage	217
Figure 6.24 Aspect de la pâte en fonction des proportions des vides	219
Figure 6.25 Influence des AM sur la compacité granulaire des pâtes avec PNS	223
Figure 6.26 Influence des AM sur la compacité granulaire des pâtes avec PC	223
Figure 6.27 Influence des AM sur la compacité granulaire des pâtes avec PNS-AV1	224
Figure 6.28 Influence des AM sur la compacité granulaire des pâtes avec PC-AV2	224
Figure 6.29 Compacité granulaire des pâtes en fonction de la surface spécifique des poudres en présence de PNS et PC	227
Figure 6.30 Compacité granulaire des pâtes en fonction de la surface spécifique des poudres en présence de PNS-AV1 et PC-AV2	227
Figure 6.31 Compacité granulaire des pâtes en fonction de la taille moyenne des poudres en présence de PNS et PC	228
Figure 6.32 Compacité granulaire des pâtes en fonction de la taille moyenne des poudres en présence de PNS-AV1 et PC-AV2	228
Figure 6.33 Évolution de la viscosité plastique à 5 et 60 min du ciment GU en présence de PNS, PC, PNS-AV1 et PC-AV2	231
Figure 6.34 Évolution du seuil de cisaillement à 5 et 60 min du ciment GU en présence	231
Figure 6.35 Évolution du seuil de cisaillement à 5 et 60 min du ciment GU en présence	232
Figure 6.36 Seuil de cisaillement à 5 et 60 min des coulis contenant les AM avec des taux de remplacement minimaux en présence de PNS	235
Figure 6.37 Viscosité plastique à 5 et 60 min des coulis contenant les AM avec des taux de remplacement minimaux en présence de PNS	235
Figure 6.38 Seuil de cisaillement à 5 et 60 min des coulis contenant les AM avec des taux de remplacement maximaux en présence de PNS	236
Figure 6.39 Viscosité plastique à 5 et 60 min des coulis contenant les AM avec des taux de remplacement maximaux en présence de PNS	236

Figure 6.40 Seuil de cisaillement à 5 et 60 min des coulis contenant les AM avec des taux de remplacement minimaux en présence de PC.....	237
Figure 6.41 Viscosité plastique à 5 et 60 min des coulis contenant les AM avec des taux de remplacement minimaux en présence de PC.....	237
Figure 6.42 Seuil de cisaillement à 5 et 60 min des coulis contenant les AM avec des taux de remplacement maximaux en présence de PC.....	238
Figure 6.43 Viscosité plastique à 5 et 60 min des coulis contenant les AM avec des taux de remplacement maximaux en présence de PC.....	238
Figure 6.44 Seuil de cisaillement à 5 et 60 min des coulis contenant les poudres avec des taux de remplacement minimaux en présence de PNS-AV1	242
Figure 6.45 Viscosité plastique à 5 et 60 min des coulis contenant les poudres avec des taux de remplacement minimaux en présence de PNS-AV1	242
Figure 6.46 Seuil de cisaillement à 5 et 60 min des coulis contenant les poudres avec des taux de remplacement maximaux en présence de PNS-AV1	243
Figure 6.47 Viscosité plastique à 5 et 60 min des coulis contenant les poudres avec des taux de remplacement maximaux en présence de PNS-AV1	243
Figure 6.48 Seuil de cisaillement à 5 et 60 min des coulis contenant les poudres avec des taux de remplacement minimaux en présence de PC-AV2.....	244
Figure 6.49 Viscosité plastique à 5 et 60 min des coulis contenant les poudres avec des taux de remplacement minimaux en présence de PC-AV2.....	244
Figure 6.50 Seuil de cisaillement à 5 et 60 min des coulis contenant les poudres avec des taux de remplacement maximaux en présence de PC-AV2.....	245
Figure 6.51 Viscosité plastique à 5 et 60 min des coulis contenant les poudres avec des taux de remplacement maximaux en présence de PC-AV2.....	245

Chapitre 7

Figure 7.1 Illustration du plan factoriel 3^2 utilisé pour les ciments ternaires.....	253
Figure 7.2 Diagramme de contour de la demande en SP des MBE-AP avec les combinaisons ternaires : (a) CV-F – FS (b) CV-F – MK (c) L100 – FS (d) CC3 – FS	265
Figure 7.3 Diagramme de contour de la viscosité plastique des MBE-AP avec les combinaisons ternaires (a) CV-F – FS (b) CV-F – MK (c) L100 – FS (d) CC3 – FS	266
Figure 7.4 Diagramme de contour du ressuage forcé des MBE-AP avec les combinaisons ternaires (a) CV-F – FS (b) CV-F – MK (c) L100 – FS (d) CC3 – FS	269
Figure 7.5 Effet de la combinaison CV-F – FS sur la chaleur d'hydratation des MBE-AP en présence de PNS-AV1 (AV1 fixe).....	272
Figure 7.6 Effet de la combinaison CV-F – FS sur la chaleur d'hydratation des MBE-AP en présence de PC-AV2 (AV2 fixe)	272
Figure 7.7 Effet de la combinaison CV-F – MK sur la chaleur d'hydratation des MBE-AP en présence de PNS-AV1 (AV1 fixe).....	273

Figure 7.8 Effet de la combinaison CV-F – MK sur la chaleur d’hydratation des MBE-AP en présence de PC-AV2 (AV2 fixe)	273
Figure 7.9 Effet de la combinaison L100 – FS sur la chaleur d’hydratation des MBE-AP en présence de PNS-AV1 (AV1 fixe).....	274
Figure 7.10 Effet de la combinaison L100 – FS sur la chaleur d’hydratation des MBE-AP en présence de PC-AV2 (AV2 fixe)	274
Figure 7.11 Effet de la combinaison CC3 – FS sur la chaleur d’hydratation des MBE-AP en présence de PNS-AV1 (AV1 fixe).....	275
Figure 7.12 Effet de la combinaison CC3 – FS sur la chaleur d’hydratation des MBE-AP en présence de PC-AV2 (AV2 fixe)	275
Figure 7.13 Diagramme de contour du temps de prise des MBE-AP avec les combinaisons ternaires (a) CV-F – FS (b) CV-F – MK (c) L100 – FS (d) CC3 – FS	278
Figure 7.14 Diagramme de contour de f'_{c1} des MBE-AP avec les combinaisons ternaires	279
Figure 7.15 Diagramme de contour de f'_{c28} des MBE-AP avec les combinaisons ternaires	280
Figure 7.16 Diagramme de contour de f'_{c91} des MBE-AP avec les combinaisons ternaires	282
Figure 7.17 Diagramme de contour de la demande en SP des MBE-SF (étalement 210 ± 10 mm)	297
Figure 7.18 Diagramme de contour de la viscosité plastique des MBE-SF (étalement 210 ± 10 mm)	298
Figure 7.19 Effet du taux de remplacement total en poudres sur l’intensité du flux thermique	301
Figure 7.20 Effet de la combinaison CV-F – FS sur la chaleur d’hydratation des MBE-SF en présence de PNS.....	302
Figure 7.21 Effet de la combinaison CV-F – FS sur la chaleur d’hydratation des MBE-SF en présence de PC	302
Figure 7.22 Effet de la combinaison CV-F – MK sur la chaleur d’hydratation des MBE-SF en présence de PNS.....	303
Figure 7.23 Effet de la combinaison CV-F – MK sur la chaleur d’hydratation des MBE-SF en présence de PC	303
Figure 7.24 Effet de la combinaison CV-C – FS sur la chaleur d’hydratation des MBE-SF en présence de PNS.....	304
Figure 7.25 Effet de la combinaison CV-C – FS sur la chaleur d’hydratation des MBE-SF en présence de PC	304
Figure 7.26 Effet de la combinaison CV-C – MK sur la chaleur d’hydratation des MBE-SF en présence de PNS.....	305
Figure 7.27 Effet de la combinaison CV-C – MK sur la chaleur d’hydratation des MBE-SF en présence de PC	305
Figure 7.28 Effet de la combinaison L120 – FS sur la chaleur d’hydratation des MBE-SF en présence de PNS.....	306
Figure 7.29 Effet de la combinaison L120 – FS sur la chaleur d’hydratation des MBE-SF en présence de PC	306

Figure 7.30 Effet de la combinaison L120 – MK sur la chaleur d’hydratation des MBE-SF en présence de PNS.....	307
Figure 7.31 Effet de la combinaison L120 – MK sur la chaleur d’hydratation des MBE-SF en présence de PC	307
Figure 7.32 Diagramme de contour des f'_{c1} des MBE-SF (étalement 210 ± 10 mm) avec les combinaisons ternaires: (a) CV-F – FS (b) CV-F – MK (c) CV-C – FS (d) CV-C – MK (e) L120 – FS (f) L120 – MK (trait plein : MBE-SF avec PNS; trait en pointillés : MBE-SF avec PC)	310
Figure 7.33 Diagramme de contour des f'_{c28} des MBE-SF (étalement 210 ± 10 mm) avec les combinaisons ternaires: (a) CV-F – FS (b) CV-F – MK (c) CV-C – FS (d) CV-C – MK (e) L120 – FS (f) L120 – MK (trait plein : MBE-SF avec PNS; trait en pointillés : MBE-SF avec PC)	312
Figure 7.34 Diagramme de contour des f'_{c91} des MBE-SF (étalement 210 ± 10 mm) avec les combinaisons ternaires: (a) CV-F – FS (b) CV-F – MK (c) CV-C – FS (d) CV-C – MK (e) L120 – FS (f) L120 – MK (trait plein : MBE-SF avec PNS; trait en pointillés : MBE-SF avec PC)	313

Chapitre 8

Figure 8.1 Indice de stabilité des MBE-AP obtenu par l’essai de la colonne de conductivité électrique	323
Figure 8.2 Résistances à la compression des BAP validés à 287 jours	327
Figure 8.3 Retrait de séchage des BAP validés	328
Figure 8.4 Quantité de CO ₂ émise par les BAP validés en fonction du coût par MPa par rapport aux mélanges de référence	330
Figure 8.5 Corrélation entre (a) $t_{40\text{étalement}}$ et la μ_{pl} des BSF pré-validés;	336
Figure 8.6 Classification de la thixotropie des BSF pré-validés	336
Figure 8.7 Résistances à la compression des BAP validés.....	338
Figure 8.8 Retrait de séchage des BSF pré-validés à 120 jours	339
Figure 8.9 Quantité de CO ₂ émise par les BSF validé en fonction du coût de 1MPa.....	340
Figure 8.10 Corrélation entre la demande en SP (exprimée en extrait sec /masse de poudre) des MBE-AP sélectionnés et les BAP correspondants validés.....	344
Figure 8.11 Corrélation entre la demande en SP (exprimée en extrait sec /masse de poudre) des MBE-SF sélectionnés et les BSF avec air entraîné correspondants validés.....	344
Figure 8.12 Corrélations entre l’étalement des MBE avec celui des bétons correspondant (a) Résultats à 10 min séparés de ceux de 30 et 60 min; (b) Résultats à 10 min séparés de ceux de 30 et 60 min mais incluant les résultats d’Erdem et coll. [2009] (d) Résultats 10, 30 et 60 min tous ensemble incluant les résultats d’Erdem et coll. [2009]	346
Figure 8.13 Corrélation entre le seuil de cisaillement des MBE-AP et des MBE-SF et	347
Figure 8.14 Corrélation entre la viscosité plastique des MBE-AP et celui des BAP correspondants..	348
Figure 8.15 Corrélation entre la viscosité plastique des MBE-AP et des MBE-SF et celle des bétons correspondants (BSF sont à air entraîné)	348

Figure 8.16 Corrélation entre f'_c des MBE-AP et celle des BAP correspondants.....	350
Figure 8.17 Comparaison entre les corrélations de f'_c dans les BAP sans air entraîné et des BSF avec air entraîné.....	350

Annexe A

Figure A.1 Effet de la date de livraison du ciment sur les propriétés des BAP en présence.....	373
Figure A.2 Effet de la date de livraison du ciment sur les propriétés des BAP en présence.....	374
Figure A.3 Effet de la date de livraison du ciment sur la viscosité plastique et la demande en SP des MBE en présence de PNS-AV1	375
Figure A.4 Effet de la date de livraison du ciment sur la viscosité plastique et la demande en SP des MBE en présence de PC-AV2.....	375
Figure A.5 Effet de la date de livraison du ciment sur les la chaleur d'hydratation des MBE en présence de PC-AV2	376
Figure A.6 Analyse thermographique des trois ciments	377
Figure A.7 Le spectre DRX des trois ciments.....	378

LISTE DES TABLEAUX

Chapitre 3

Tableau 3. 1 Identification des poudres.....	55
--	----

Chapitre 4

Tableau 4.1 Identification et propriétés physiques des différents ajouts minéraux et fillers	91
Tableau 4.2 Caractéristiques physico-chimiques du ciment et des ajouts minéraux.....	91
Tableau 4.3 Modules hydrauliques des laitiers étudiés [Saric-Coric, 2001]	96
Tableau 4.4 Granulométrie et propriétés physiques du sable	103
Tableau 4.5 Granulométrie et propriétés physiques des gros granulats	104
Tableau 4.6 Propriétés des adjuvants	105
Tableau 4.7 Exigences des bétons de référence	107
Tableau 4.8 Composition et propriétés des bétons de référence	107
Tableau 4.9 Composition et propriétés des MBE de référence	108
Tableau 4.10 Optimisation de la formulation du mélange de référence avec SP à base de PNS (BAP-REF1)	113
Tableau 4.11 Optimisation de la formulation du mélange de référence avec SP à base de PC (BAP-REF2)	114

Chapitre 5

Tableau 5.1 Valeurs caractéristiques des courbes d'hydratation des MBE-AP	147
Tableau 5.2 Récapitulation des mesures d'étalement en fonction du temps	165
Tableau 5.3 Valeurs caractéristiques des courbes d'hydratation des MBE-AP	178

Chapitre 6

Tableau 6.1 Récapitulatif des paramètres de l'ajustement de la distribution Rosin-Rammler et des propriétés rhéologiques des MBE	198
Tableau 6.2 Description de la forme des particules	206
Tableau 6. 3 Récapitulatif du facteur de forme des ajouts minéraux et des propriétés rhéologiques des MBE	206
Tableau 6. 4 Comparaison entre les différents modes de compaction	216
Tableau 6. 5 Consistance des pâtes de ciment correspondant à la compacité maximale	219

Tableau 6.6 Récapitulatif des résultats de la compacité granulaire maximale en présence des différents AM, fillers et adjuvants chimiques	225
Tableau 6.7 Récapitulatif des points de saturation en SP des coulis contenant différents AM sans et avec l'agent de viscosité.....	232
Tableau 6.8 Augmentation du volume total de la pâte dans les MBE et du volume total des poudres résultant des remplacements massique et volumique du ciment par des AM	247
Tableau 6.9 Comparaison des résultats rhéologiques des MBE-AP résultant des remplacements massique et volumique du ciment par la CV-F et la CV-C en présence de PNS-AV1	247

Chapitre 7

Tableau 7.1 Valeurs codées et valeurs absolues des variables expérimentales pour les différentes combinaisons des MBE-AP ternaires.....	254
Tableau 7.2 Modèles statistiques pour la demande en SP des huit combinaisons des MBE-AP	256
Tableau 7.3 Modèles statistiques pour μ_{pl} des huit combinaisons des MBE-AP	256
Tableau 7.3 Modèles statistiques pour μ_{pl} des huit combinaisons des MBE-AP (suite).....	257
Tableau 7.4 Modèles statistiques pour le ressuage forcé des huit combinaisons des MBE-AP	257
Tableau 7.5 Modèles statistiques pour le temps de prise des huit combinaisons des MBE-AP	258
Tableau 7.6 Modèles statistiques pour f'_{c1} des huit combinaisons des MBE-AP	258
Tableau 7.6 Modèles statistiques pour f'_{c1} des huit combinaisons des MBE-AP (suite)	259
Tableau 7.7 Modèles statistiques pour f'_{c28} des huit combinaisons des MBE-AP	259
Tableau 7.8 Modèles statistiques pour f'_{c91} des huit combinaisons des MBE-AP	260
Tableau 7.9 Représentation mathématique des modèles obtenus pour la demande en SP des huit combinaisons des MBE-AP	260
Tableau 7.10 Représentation mathématique des modèles obtenus pour la viscosité plastique des huit combinaisons des MBE-AP	261
Tableau 7.11 Représentation mathématique des modèles obtenus pour le ressuage forcé des huit combinaisons des MBE-AP	261
Tableau 7.12 Représentation mathématique des modèles obtenus pour le temps de prise des huit combinaisons des MBE-AP	262
Tableau 7.13 Représentation mathématique des modèles obtenus pour f'_{c1} des huit combinaisons des MBE-AP.....	262
Tableau 7.14 Représentation mathématique des modèles obtenus pour f'_{c28} des huit combinaisons des MBE-AP.....	263
Tableau 7.15 Représentation mathématique des modèles obtenus pour f'_{c91} des huit combinaisons des MBE-AP.....	263
Tableau 7. 16 Valeurs codées et valeurs absolues des variables expérimentales pour les différentes combinaisons des MBE-AP ternaires.....	286
Tableau 7.17 Modèles statistiques pour la demande en SP des 12 combinaisons des MBE-SF	287
Tableau 7.18 Modèles statistiques pour μ_{pl} des 12 combinaisons des MBE-SF	288
Tableau 7.19 Modèles statistiques pour f'_{c1} des 12 combinaisons des MBE-SF	289
Tableau 7.20 Modèles statistiques pour f'_{c28} des 12 combinaisons des MBE-SF	290

Tableau 7.21 Modèles statistiques pour f'_{c91} des 12 combinaisons des MBE-SF	291
Tableau 7.22 Représentation mathématique des modèles obtenus pour la demande en SP des huit combinaisons des MBE-SF	292
Tableau 7.23 Représentation mathématique des modèles obtenus pour la μ_{pl} des huit combinaisons des MBE-SF	293
Tableau 7.24 Représentation mathématique des modèles obtenus pour f'_{c1} des huit combinaisons des MBE-SF	294
Tableau 7.25 Représentation mathématique des modèles obtenus pour f'_{c28} des huit combinaisons des MBE-SF	294
Tableau 7.26 Représentation mathématique des modèles obtenus pour f'_{c91} des huit combinaisons des MBE-SF	295
Tableau 7. 27 Valeurs caractéristiques des courbes d'hydratation des MBE-SF ternaires	308

Chapitre 8

Tableau 8.1 Critères et résultats de l'optimisation multiparamétrique des MBE-AP	321
Tableau 8.2 Critères et résultats de l'optimisation multiparamétrique des MBE-SF	322
Tableau 8.3 Composition des BAP validés (étalement 680 ± 20 mm)	324
Tableau 8.4 Composition des BAP validés	325
Tableau 8.5 Résistances à la compression et retrait de séchage des BAP validés	327
Tableau 8.6 Composition des BSF (PNS-AEA1) pré-validés (étalement 550 ± 20 mm)	331
Tableau 8.7 Composition des BSF (PC-AEA2) pré-validés (étalement 550 ± 20 mm).....	331
Tableau 8.8 Composition des BSF (PNS) pré-validés	333
Tableau 8.9 Composition des BSF (PC) pré-validés.....	334
Tableau 8.10 Résistances à la compression des BSF pré-validés	337
Tableau 8.11 Propriétés à l'état frais des BSF ternaires sélectionnés	341
Tableau 8.12 Propriétés à l'état durci des BSF ternaires sélectionnés pour la validation finale	342

Annexe A

Tableau A.1 Perte de masse lors de l'analyse thermographique	377
--	-----

LISTE DES NOMENCLATURES

μ	=	viscosité
μ_{pl}	=	viscosité plastique
τ	=	seuil de cisaillement
τ_0	=	seuil de cisaillement dynamique
τ_s	=	seuil de cisaillement statique
AC ou AV	=	agent colloïdal ou agent de viscosité
AEA	=	agent entraîneur d'air
AM	=	ajouts minéraux
BAP	=	béton autoplaçant
BAP-REF1	=	béton autoplaçant de référence en présence du couple PNS-AV1
BAP-REF2	=	béton autoplaçant de référence en présence du couple PC-AV2
BSF	=	béton semi-fluide
BSF-REF1	=	béton semi-fluide de référence en présence de PNS
BSF-REF2	=	béton semi-fluide de référence en présence de PC
CC3	=	filler calcaire à finesse élevée
CC35	=	filler calcaire à finesse modérée
CV-C	=	cendre volante Classe F
CV-F	=	cendre volante Classe C
E/C	=	eau/ciment
E/P	=	eau/poudre
FS	=	fumée de silice
L100	=	laitier à finesse modérée
L120	=	laitier à finesse élevée
LHF	=	laitier de haut fourneau
MBE-AP	=	mortier de béton équivalent à caractère autoplaçant
MBE-SF	=	mortier de béton équivalent à caractère semi-fluide
M.E	=	module d'élasticité
MK	=	metakaolin
PC	=	superplastifiant à base de polycarboxylate
PNS	=	superplastifiant à base de polynaphtalène
R.F	=	ressuage forcé
S/G	=	sable/granulats
SP	=	superplastifiant
SP-PC	=	superplastifiant à base de polycarboxylates
SP-PNS	=	superplastifiant à base de polynaphtalène sulfoné
T.P	=	temps de prise

CHAPITRE 1 : INTRODUCTION

Ces dernières années, on assiste à une concurrence dans le marché de la construction où les ouvrages ont des tendances architecturales beaucoup plus complexes et des formes plus vertigineuses. Cette concurrence est due à l'avancement technologique dans le domaine des matériaux de construction notamment dans le béton où un intérêt particulier se porte de plus en plus sur les bétons fluides. Ces derniers ont pu satisfaire aux exigences des constructions modernes (formes complexes, ferrailage dense, court délai de construction, meilleures conditions de travail).

Cependant, l'emploi des bétons fluides s'est accompagné de nouveaux défis tels que le blocage lors de l'écoulement, la ségrégation et les pressions sur les parois des coffrages [Khayat et coll., 2002; Koehler et coll., 2008; Khayat et coll., 2007; Billberg, 2007]. La clé pour confronter ces défis est d'avoir plus de connaissances sur le comportement à l'état frais des bétons fluides y compris les propriétés rhéologiques qui sont évoquées afin de les adapter selon l'application visée [Tattersall et coll., 1983; Ferraris et coll., 1998].

Par ailleurs, il est bien admis que la fabrication des bétons fluides nécessite une grande quantité de poudres, c.-à-d. ajouts minéraux (AM) et d'adjuvants chimiques en comparaison avec les bétons conventionnels. Le remplacement partiel du ciment par des AM est devenu une pratique très répandue dans l'industrie du ciment et du béton visant l'amélioration des propriétés du béton mais aussi la réduction de l'émission des gaz à effet de serre (GES) qui est devenue un enjeu planétaire.

En effet, beaucoup d'efforts ont contribué depuis 40 ans à diminuer l'émission de CO₂ presque de 50% (de 1,7 tonne à presque 0,8 tonne par tonne de clinker) pour les fours courts munis de précalcinateur et préchauffeur [Aïtcin, 2006]. Encore aujourd'hui, plusieurs travaux se font dans le but d'alléger cette empreinte où divers aspects sont traités comme le changement de la source d'énergie, réduction de la température de cuisson du clinker et même conversion de CO₂ émis en déchet peu polluant [Albino et coll. 2011; Khoo et coll., 2006]. Cependant, en attendant que des percés scientifiques se fassent encore, le moyen le plus efficace pour

diminuer de 20 à 30% des GES en CO₂ consiste au remplacement partiel du ciment par des sous-produits industriels [Aïtcin, 2006].

L'incorporation des AM, comme la fumée de silice, le laitier de haut fourneau et les cendres volantes, dans la formulation du béton comme substituant du ciment, peut apporter beaucoup de changements sur le plan rhéologique (ouvrabilité, déformabilité et stabilité). Ces sous-produits présentent un défi réel de compatibilité entre eux et les adjuvants chimiques, notamment les superplastifiants (SP). Ceci est d'autant plus important du fait que la mise en place, le développement microstructural des bétons ainsi que leurs propriétés mécaniques et de durabilité sont étroitement liés au contrôle de leurs propriétés rhéologiques.

Cette thèse de recherche s'inscrit dans le cadre de la « chaire de recherche industrielle sur les bétons à haute performance fluides à rhéologie adaptée (BHPFRA) » piloté par le Prof. K.H. Khayat entre 2008 et 2013. La conception de cette nouvelle génération de bétons à haute performance requiert, entre autres, des connaissances particulières des paramètres rhéologiques qui affectent considérablement la mise en place, la résistance à la ségrégation, la pompabilité, la pression sur les coffrages et la qualité de surface. L'objectif principal de cette thèse est d'étudier l'effet des caractéristiques des AM et leurs interactions avec les adjuvants sur les différentes propriétés des milieux à matrices cimentaires (pâtes, mortiers et bétons).

Nombreuses sont les recherches qui ont été menées sur l'influence des AM sur les propriétés à l'état frais et durci des milieux à matrices cimentaires [Tattersall, 1991; Szecsy, 1997; Ferraris et coll. 2001; Park et coll., 2005; Gesoğlu et coll., 2009]. Toutefois, des connaissances limitées existent sur les bénéfices potentiels de ces matériaux dans les matrices très fluides, avec des rapports eau/poudres (E/P) relativement élevés et proportionnées simultanément avec des SP et des agents de viscosité (AV). L'établissement d'une telle plateforme de données s'avère très essentielle et s'inscrit comme une première étape dans le cadre de la chaire de recherche pour développer des BHPFRA.

Cette étude est menée sur deux types de BHPFRA qui sont les bétons autoplaçants (BAP) pour la construction de bâtiments et les bétons semi-fluides (BSF) destinés aux infrastructures de transport. Par ailleurs, des études ont démontré que des tests à l'échelle réduite sur des mortiers de bétons équivalents (MBE) peuvent être utilisés pour évaluer l'influence de la

composition du mélange MBE sur les propriétés rhéologiques des bétons fluides [Schwartzentruber et coll., 2000; Erdem et coll., 2009]. Par conséquent, cette étude est faite principalement sur des MBE qui correspondent aux deux consistances visées à savoir les MBE autoplaçants (MBE-AP) et les MBE semi-fluides (MBE-SF). Par la suite, une validation à l'échelle des bétons est prévue pour les deux consistances.

Les objectifs spécifiques de cette thèse sont :

- Évaluer et comprendre l'effet des différentes caractéristiques chimiques et physiques des AM ainsi que leurs interactions avec les SP et les AV, sur les propriétés rhéologiques, la stabilité, la cinétique d'hydratation et la résistance à la compression des MBE-AP et des MBE-SF;
- Établir une base de données complète sur l'effet de huit différents AM (un type de ciment, six AM et deux fillers calcaires) dans des systèmes binaires et ternaires en présence de deux types de SP, sans et avec deux types d'AV compatibles, sur les propriétés des MBE-AP et les MBE-SF;
- Développer deux types de BHPRA (BAP et BSF) écologiques contenant un remplacement maximal en AM, tout en présentant les meilleurs rapports performance/prix;
- Élaborer des corrélations entre les résultats trouvés à l'échelle des MBE et des bétons validés;
- Évaluer la performance et les limites de la méthode des MBE.

Pour arriver aux objectifs visés, cette étude est divisée en trois phases principales :

- 1- Effet des ciments binaires sur les propriétés des MBE (MBE-AP et MBE-SF);
- 2- Effet des caractéristiques chimiques et physiques des ciments binaires sur les propriétés rhéologiques des MBE (MBE-AP et MBE-SF);
- 3- Effet des ciments ternaires sur les propriétés des MBE (MBE-AP et MBE-SF); et
- 4- Validation des ciments ternaires sur deux types de BHPRA (BAP et BSF).

Cette thèse comporte au total neuf chapitres y compris ce même chapitre d'introduction générale. Le chapitre 2 présente une synthèse bibliographique faisant le point particulièrement

sur l'intérêt d'étudier les propriétés rhéologiques et les résultats déjà trouvés sur l'effet des AM sur les propriétés des systèmes à matrices cimentaires. Des détails sur la méthodologie, le programme expérimental suivi, la caractérisation des matériaux ainsi que la définition des mélanges de référence apparaissent dans les chapitres 3 et 4. Par la suite, le chapitre 5 expose l'effet des ciments binaires sur les propriétés des MBE où le remplacement partiel du ciment par huit différents AM incorporés à tour de rôle en présence de deux différents couples SP-AV dans les MBE-AP et deux types de SP dans les MBE-SF. Les propriétés étudiées dans ce chapitre sont les propriétés rhéologiques, la cinétique d'hydratation et le développement des résistances. Le chapitre 6 consiste à interpréter minutieusement les résultats trouvés dans le chapitre 5 et à lier les différentes propriétés des AM ainsi que leurs interactions avec les adjuvants (SP-AV) avec les propriétés rhéologiques (seuil de cisaillement et viscosité plastique). Les caractéristiques traitées des AM sont : la surface spécifique mesurée par BET, granulométrie en utilisant la distribution de Rosin-Rammler, la morphologie des particules à travers le facteur de forme Ferret et compacité granulaire mesurée par la méthode humide.

Les résultats trouvés dans le chapitre 5 ont été exploités afin de classer les huit AM en deux classes : les poudres à faibles réactivité et les poudres à réactivité élevée. La combinaison de ces deux classes de poudres a permis de confectionner des ciments ternaires. Ceci a fait l'objet du chapitre 7 où on trouve la plus grande banque de données, en utilisant la méthode des plans d'expérience, de l'effet des ciments ternaires sur la demande en SP, les propriétés rhéologiques, la chaleur d'hydratation et le développement des résistance de deux différentes consistances de MBE (MBE-AP et MBE-SF).

L'étude expérimentale est clôturée par l'exploitation des résultats trouvés sur MBE-AP et MBE-SF pour une validation à l'échelle des bétons afin d'évaluer la performance de la méthode du MBE dans la conception des BHPFRA ainsi que de développer quelques bétons pour les applications visées (constructions de bâtiments et infrastructures de transport) (Chapitre 8). Finalement, les conclusions générales et les perspectives futures sont résumées dans le chapitre 9.

CHAPITRE 2 : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

2.1 INTRODUCTION

Souvent, quand il est question des propriétés du béton, ce sont les propriétés à l'état durci qui sont abordées. En effet, les propriétés mécaniques, propriétés viscoélastiques, propriétés de durabilité et propriétés structurales sont des propriétés nécessaires pour qu'un béton soit utilisé en pratique. Cependant, avant de passer à l'état durci, le béton passe par une phase maniable durant laquelle il peut être mis en place. Les propriétés du béton frais sont donc très importantes car si le béton ne peut être placé correctement, les propriétés souhaitées à l'état durci ne seront pas acquises.

Depuis les années 90, de nombreux travaux ont abouti à la réalisation et l'émergence de nouvelles constructions, et ce malgré la complexité de leur architecture et/ou leur très forte concentration en armatures. Cette avancée technologique dans le domaine des matériaux de construction et notamment dans le béton est due, pour une grande part, au développement des connaissances dans la fabrication du ciment portland et tous les changements survenus dans les ciments modernes. Ceci dit, un autre facteur est venu renforcer ce développement. Il s'agit d'assurer la fluidité nécessaire par l'utilisation des AM (matériaux cimentaires), des adjuvants fluidifiants et des agents de viscosité. Depuis, l'émergence de différents types de bétons de plus en plus fluides tels que les bétons pompés et les bétons autoplacants est observée.

Néanmoins, l'arrivée de ces nouveaux bétons fluides est accompagnée par de nouveaux problèmes tels que le blocage lors de l'écoulement, la ségrégation et les pressions sur les parois des coffrages.

Afin de répondre à ces problèmes, il est important de pouvoir identifier le comportement en écoulement de ces matériaux, d'où l'importance de bien connaître les propriétés rhéologiques du béton à l'état frais, car si le béton ne peut être placé correctement, les propriétés souhaitées à l'état durci (résistances mécaniques, durabilité, etc.) ne seront pas adéquates.

La rhéologie est considérée l'un des facteurs les plus importants pour les bétons à haute performances et les bétons fluides. Afin de prédire l'écoulement du béton à l'état frais,

plusieurs tentatives ont été menées sur les mesures de fluidité des systèmes cimentaires (pâtes de ciment, mortiers et bétons) à partir des mesures conventionnelles comme l'affaissement ou l'étalement au cône d'Abrams. Les résultats étaient que ces mesures peuvent être identiques pour des mélanges présentant différents comportements à l'écoulement. Cette différence peut être détectée par les mesures rhéologiques (figure 2.1). Cependant, afin de déterminer les propriétés d'un fluide non newtonien, que présentent tous les systèmes cimentaires, une courbe d'écoulement doit être présentée à partir de deux mesures au minimum, car une seule mesure ne suffit pas pour une description correcte du comportement de ce matériau.

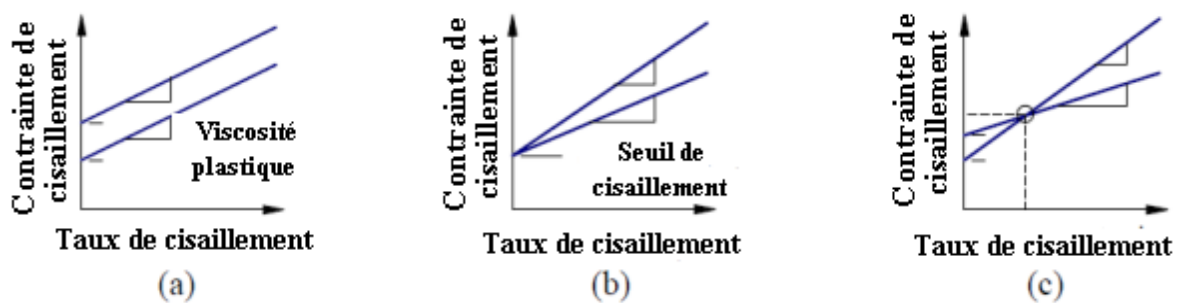


Figure 2.1 Illustration du comportement du béton avec : (a) même viscosité et seuils de cisaillement différents, (b) même seuil de cisaillement (τ) et viscosités plastiques (μ_{pl}) différentes, (c) même mesures empiriques et différents seuils de cisaillement et viscosités plastiques [Esping, 2007]

Afin de toucher les différents aspects de la rhéologie des systèmes cimentaires fluides, cette revue bibliographique se porte en premier lieu sur le ciment portland, ses caractéristiques et son hydratation en présence des ajouts minéraux suivies des notions fondamentales de la rhéologie avec une synthèse de l'influence des ajouts cimentaires et des adjuvants chimiques sur les propriétés des systèmes cimentaires.

2.2 CARACTÉRISTIQUES ET HYDRATATION DU CIMENT PORTLAND

2.6.1 Composition du ciment portland

Le ciment Portland (CP) est un mélange de clinker et d'un certain pourcentage de sulfate de calcium (3 à 5%). Le clinker du CP est obtenu par la cuisson à haute température (environ

1450 °C) de la matière première constituée de 80% de calcaire (source de calcium) et 20% d'argile (silicoaluminates). Des correcteurs, comme le minerai de fer sous forme d'oxydes Fe_2O_3 , la bauxite (Al_2O_3) ou le sable (SiO_2), sont ajoutés pour atteindre la composition souhaitée. Au cours de la cuisson, le calcium se combine avec les autres composants pour former quatre constituants principaux qui forment 90% de la masse du ciment, dont les proportions déterminent les caractéristiques principales du ciment. Ces constituants sont indiqués dans le Tableau 2.1 [Taylor, 1997].

Tableau 2.1 Principaux constituants du clinker

Constituant	Composition	Notation cimentaire	Composition (% masse clinker)	Nom particulier
Silicate tricalcique	$3\text{CaO}.\text{SiO}_2$	C_3S	(50 à 70%)	Alite
Silicate dicalcique	$2\text{CaO}.\text{SiO}_2$	C_2S	(15 à 30%)	Bélite
Aluminate tricalcique	$3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A	(5 à 15%)	} Célite
Alumino-ferrite tétracalcique	$4\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.\text{Fe}_2\text{O}_3$	C_4AF	(5 à 15%)	

Le clinker contient également des oxydes mineurs tels que l'oxyde de magnésium, le dioxyde de titane, le dioxyde de manganèse, l'oxyde de potassium et l'oxyde de sodium. Leurs teneurs sont de quelques pourcents par rapport à la masse du clinker. Le terme mineur se réfère principalement à leur teneur et non à l'influence qu'ils peuvent avoir sur les propriétés du ciment.

Selon la norme CSA A3000, les CP sont classés en six types pour différentes applications :

- Type GU pour usage général;
- Type HE à haute résistance initiale;
- Type MS à résistance modérée aux sulfates;
- Type HS à résistance élevée aux sulfates;
- Type MH à chaleur d'hydratation élevée;
- Type LH à faible chaleur d'hydratation.

2.6.2 Hydratation des phases du ciment portland

L'hydratation d'un CP peut se résumer, dans une approche simplifiée, à l'ensemble des réactions entre les différentes phases du ciment (C_3S , C_2S , C_3A et C_4AF) et l'eau de gâchage. Ces réactions sont exothermiques et sont responsables de la prise et du durcissement du ciment. Le matériau passe donc d'un état de suspension de particules floculées à celui de solide viscoélastique. L'hydratation du ciment est un processus très complexe. En effet, les mécanismes d'hydratation des silicates (C_3S et C_2S) et des aluminates (C_3A et C_4AF) seront traités séparément pour arriver à traiter l'hydratation du CP.

2.6.2.1 Hydratation des silicates

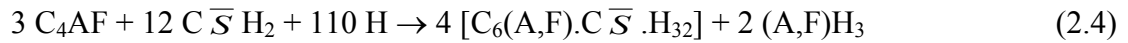
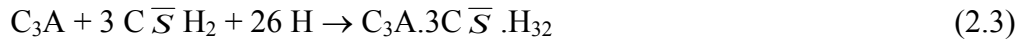
Les silicates tricalcique et bicalcique ne se diffèrent que par la stœchiométrie. Les hydrates produits par la dissolution de ces deux silicates, très solubles, sont des silicates de calcium hydratés, plus communément appelés C-S-H et de la chaux hydratée (portlandite), désignée par CH. Les C-S-H sont des hydrates de stœchiométrie variable. Le rapport entre le nombre de moles de calcium sur celui de silice donne une indication sur cette stœchiométrie. Les C-S-H précipitent autour des grains de ciment et forment une couche qui ralentit la cinétique de dissolution des anhydres, qui devient contrôlée par la diffusion ionique au sein des hydrates. La portlandite précipite quant à elle dans la solution interstitielle. À titre indicatif, les équations des réactions d'hydratation des silicates peuvent s'écrire, sans prendre en compte la stœchiométrie du système, comme suit [Neville, 2000] :



Les différences entre les produits d'hydratation des deux silicates se traduisent par une proportion plus faible de portlandite pour le C_2S et par une réaction beaucoup plus lente de ces mêmes silicates. L'hydratation plus lente du C_2S , après 28 jours, conduit à l'amélioration des résistances à long terme.

2.6.2.2 Hydratation des aluminates

La réaction des aluminates avec l'eau est très rapide. Les cimentiers ajoutent du sulfate sous forme de gypse au clinker pour contrôler ces réactions. Les aluminates réagissent avec le sulfate du gypse pour former de l'ettringite (appelé AFt) comme il est indiqué par les réactions d'ici-bas.



Une couche d'hydrates vient entourer les aluminates qui forment donc une couche protectrice autour du grain. Lorsque la source de gypse s'est épuisée, la concentration en sulfates de la solution baisse. L'ettringite devient donc instable et se dissout pour former du monosulfo-aluminates de calcium hydraté (appelé AFm) selon les réactions suivantes:



Une fois que l'ettringite a fini sa transformation, les aluminates restants réagissent avec l'eau afin de donner trois types d'hydrates : C_2AH_8 , C_4AH_{13} et C_3AH_6 .

2.6.2.3 Hydratation du ciment portland

L'hydratation du CP est la conséquence de plusieurs réactions chimiques apparaissant simultanément. La technique la plus pratique pour déterminer l'avancement de cette l'hydratation est l'essai de calorimétrie, à partir duquel le dégagement de chaleur qui accompagne la réaction d'hydratation est mesuré. Le processus de l'hydratation peut être divisé en cinq phases distinctes (figure 2.35) :

A) Période I (Période d'induction)

Dès que l'eau entre en contact avec le ciment, le C_3S et le C_3A des grains de ciment réagissent immédiatement avec l'eau, formant de l'ettringite et un gel de C-S-H autour des grains de ciment.

B) Période II (Période dormante)

Durant cette période, des ions Ca^{2+} et OH^- sont libérés. Ceci augmente donc le pH de la solution en ralentissant la dissolution des constituants. Le dégagement de chaleur est donc faible. Cette période correspond à la phase durant laquelle les systèmes cimentaires sont maniables.

A) Période III (Période de prise)

Cette période débute lorsque la concentration en ions Ca^{2+} et OH^- de la solution devient critique. La conductivité électrique de la solution est donc à son maximum. Cette sursaturation induit la précipitation de la portlandite. Il s'ensuit donc les mécanismes de dissolution, de nucléation et de précipitation des différentes phases, permettant la formation des hydrates (ettringite, portlandite et C-S-H) qui conduit au développement de petits amas. Ces derniers se connectent entre eux progressivement jusqu'à ce qu'un premier chemin de grains connectés traverse le matériau; le seuil de percolation qui correspond, selon Acker [1988], à un début de prise mécanique est donc atteint.

B) Période IV (Période de durcissement)

La formation d'ettringite à partir des C_3A aboutit à l'épuisement du gypse. L'ettringite réagit avec les aluminates en excès pour former de monosulfo-aluminate, ce qui se traduit par un second pic thermique. La chaleur ainsi produite accélère l'hydratation des silicates.

C) Période V (Période de ralentissement)

Les grains de ciment se couvrent d'une couche d'hydrates qui, en se densifiant, ralentit la diffusion de l'eau vers l'interface réactionnelle. L'hydratation se poursuit de plus en plus lentement.

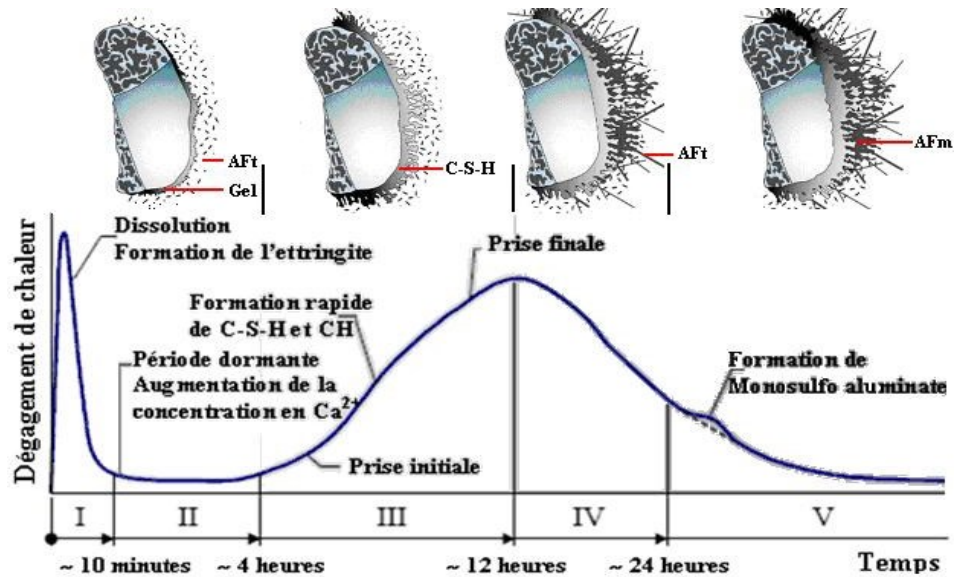


Figure 2.2 Dégagement de chaleur et de l'évolution de la microstructure lors de l'hydratation du ciment [Esping, 2007]

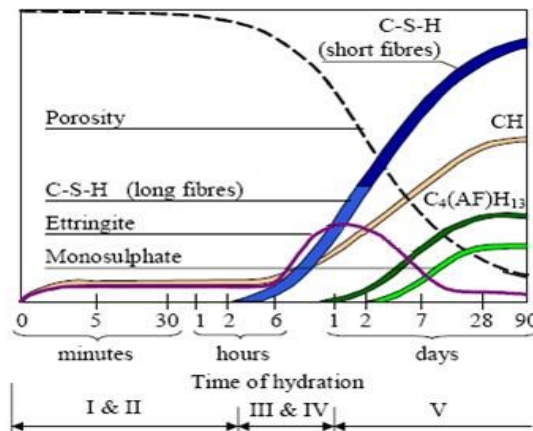


Figure 2.3 Hydrates associés aux différentes phases de l'hydratation du ciment [Locker et coll., 1976]

La figure 2.36, schématise les produits associés aux différentes phases de l'hydratation du ciment ainsi que le changement de la porosité. Le processus de la prise est la conséquence d'un changement d'une suspension concentrée de particules floculées à un état viscoélastique capable de subir une application de contrainte. La prise est contrôlée principalement par l'hydratation des aluminates et des silicates tricalciques, et survient lorsque la période dormante se termine par une hydratation rapide des C_3A et C_3S entraînant une augmentation de la température.

2.3 L'HYDRATATION EN PRÉSENCE DES AJOUTS MINÉRAUX

Les ajouts minéraux (AM) sont des sous-produits provenant de différentes industries dont le coût s'agit souvent des coûts de manutention et du broyage. L'incorporation de ces matériaux tels que la cendre volante, le laitier de haut fourneau, la fumée de silice ou encore les fillers calcaires comme substituants du ciment s'avère le moyen le plus facile et efficace pour diminuer les émissions en CO_2 liées à la fabrication du clinker. De plus, c'est une façon de valoriser des coproduits peu utilisés à l'échelle mondiale. De plus, l'utilisation des AM dans la fabrication des bétons, avec un bon proportionnement et un mûrissement adéquat, présente plusieurs avantages comme l'amélioration de l'ouvrabilité, la diminution de la chaleur dégagée par les réactions d'hydratation et l'amélioration de la durabilité.

Généralement, les AM les plus couramment utilisés dans l'industrie du béton sont classifiés en trois catégories : les ajouts aux propriétés pouzzolaniques, les ajouts aux propriétés hydrauliques et les fillers. Dans la catégorie des ajouts aux propriétés pouzzolaniques, on y trouve les pouzzolanes naturelles, les cendres volantes, la fumée de silice et le métakaolin qui réagissent avec la portlandite (CH) pour former des C-S-H. Pour les ajouts aux propriétés hydrauliques, on y trouve principalement les laitiers de haut fourneau qui ont besoin de chaux pour activer leur réaction d'hydratation pour former des C-S-H secondaires. Les caractéristiques des AM les plus utilisés et leurs réactions d'hydratation sont résumés ci-dessous.

2.3.1 Cendre volante

Les cendres volantes (CV) sont des particules fines récupérées des installations de dépoussiérage des centrales thermiques. Elles se présentent généralement sous forme de particules sphériques dont le diamètre est compris entre 1 à 100 μm et pouvant avoir différentes compositions chimiques en fonction du combustible utilisé. Les CV sont constituées d'une phase vitreuse alumino-silicatée (60% à 90%) qui est à l'origine de la réactivité pouzzolanique. Les deux classes les plus utilisées dans le domaine du béton sont la classe F dont la somme ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$) est supérieure à 70% et la classe C où cette somme est inférieure à 70% avec une teneur en CaO supérieur à 10% [ASTM C618].

Les réactions pouzzolaniques des CV sont lentes. Pour des pâtes de ciment qui contiennent 40% de CV, 30% de ces cendres sont hydratés après 3 mois et pour 60% de CV, 20% sont hydratés après cette même durée [Taylor et coll., 1985; Taylor, 1997].

Pour que la réaction pouzzolanique s'active, il faut que la réaction d'hydratation du ciment s'amorce et qu'une quantité suffisante de CH se forme. La réaction pouzzolanique dépend aussi de l'alcalinité du milieu où elle est ralentie en présence des ajouts comme le laitier ou la fumée de silice qui ont tendance à diminuer le pH de la solution interstitielle. Le développement de la réaction pouzzolanique contribue à diminuer la teneur en CH puis cette dernière est consommée pour former des C-S-H dont le rapport C/S en présence des CV est inférieur à celui qui est formé par un ciment portland [Rodger et coll., 1988]. L'incorporation des CV contribue significativement à diminuer la chaleur dégagée lors de l'hydratation du ciment et provoque une diminution du pH de la solution interstitielle.

2.3.2 Laitier de haut fourneau

Le laitier de haut fourneau est un sous-produit de la fabrication de la fonte. C'est un matériau qui présente des propriétés hydrauliques lorsqu'il est activé. Lors de la présence du ciment avec le laitier, le clinker s'hydrate en premier par la dissolution des C_3S pour former le C-S-H et le CH. L'hydratation du laitier est alors activée par la chaux qui conduit à la formation du C-S-H et de C_4AH_{13} . L'augmentation de l'alcalinité de la solution interstitielle, par les sulfates de calcium ou de la soude ou de la potasse, permet aussi d'amorcer l'hydratation du laitier. Les produits d'hydratation du laitier sont alors le C-S-H et l'ettringite [Aïtcin, 2006]. L'utilisation du laitier de haut fourneau permet de diminuer significativement la chaleur dégagée surtout pour des dosages supérieurs à 50%, ce qui est très avantageux pour les bétons de masse et le bétonnage à temps chaud.

2.3.3 Fume de silice

La fumée de silice (FS) est un produit de la fabrication du silicium et de différents ferro-silicium qui sont produits dans de puissants arcs électriques où le quartz est réduit à l'état de silicium. Au cours de cette réduction dans l'arc électrique, il se forme des poussières de SiO_2 qui s'oxyde en se refroidissant lorsqu'elles sont aspirées par la cheminée qui surmonte le four

à arc. Ces particules gazeuses se condensent sous forme de particules sphériques microscopiques de silice amorphe avec un diamètre inférieur à 0,1 μm et une surface spécifique qui varie de 10 à 25 000 m^2/kg .

La FS peut jouer un double rôle dans les milieux à matrice cimentaire. C'est une pouzzolane très réactive qui se combine avec la CH issue de l'hydratation du ciment pour former du C-S-H mais peut aussi jouer le rôle de fillers grâce à son très faible diamètre [Aïtcin, 2006]. La FS peut ne pas exhiber une réactivité pouzzolanique élevée si elle n'est pas bien dispersée. En effet, dû à sa grande finesse, la FS peut se trouver sous forme d'agglomérats conduisant à une cinétique de réaction très lente [Sanchez et coll., 1999]. De plus, les très fines particules de la FS constituent des sites de nucléation pour la germination des produits de CH, ce qui peut accélérer la réaction d'hydratation. D'ailleurs, la chaleur dégagée en présence d'un faible pourcentage en FS est plus importante que celle dégagée par le ciment portland [Ma et coll., 1994].

2.3.4 Métakaolin

Le métakaolin (MK) est une pouzzolane artificielle très réactive obtenue par calcination de kaolin. C'est un AM très fin mais plus grossier que la FS et moins couteux que cette dernière. Comme pour la FS, les fines particules du MK jouent le rôle de fillers et constituent des sites de nucléation, ainsi que sa réactivité pouzzolanique se produit lorsqu'une quantité suffisante de CH est formée de l'hydratation du ciment. Cette réaction forme un C-S-H supplémentaire ainsi que des produits cristallins qui comprennent les aluminates de calcium hydratés et l'alumino-silicate hydraté [Kinuthia et coll., 2000].

2.3.5 Fillers

Les fillers sont des produits obtenus par broyage fin de certaines roches naturelles, entre autres le calcaire et le basalte. Les fillers les plus connus sont les fillers calcaires qui se composent principalement de carbonate de calcium CaCO_3 . Le rôle principal des fillers est le remplissage inter-particulaire. Cependant, certaines études ont montré que les fillers ne sont pas complètement inertes et que les fines particules peuvent réagir avec le C_3A pour former du carboaluminate de calcium [Klemm et coll., 1990; Bonavetti et coll., 2001].

2.4 INTERÊT DES CIMENTS TERNAIRES

L'incorporation des ciments ternaires (ciment + deux ajouts cimentaires) dans la formulation des systèmes cimentaires (pâtes, mortiers et bétons) peut conférer des synergies intéressantes comme:

- Une résistance à la compression plus élevée avec une meilleure résistance à la perméabilité des ions chlorure [Alexander et coll., 1999; Bâgel, 1998; Lam et coll., 1998].
- La cinétique de réaction entre la portlandite et les CV est plus lente qu'avec la fumée de silice ou le métakaolin [Poon et coll., 1999; Poon et coll., 2001]
- Lorsque la FS est utilisée avec la CV, la portlandite résultante de la réaction d'hydratation du ciment est consommée initialement par réaction pouzzolanique de la FS puis par la réaction pouzzolanique de la CV. La combinaison de la FS avec la CV (ou le laitier de haut fourneau) peut avoir un effet négatif sur l'hydratation où cette dernière est retardée en comparaison avec la FS dans les ciments binaire [Langan et coll. 2002; Sioulas et coll., 2000]
- La combinaison de la fumée de silice avec le laitier donne les meilleures résistances à la compression à jeune et moyen âge avec une meilleure durabilité [Bâgel, 1998].

2.5 CONCEPTS FONDAMENTAUX EN RHÉOLOGIE

La rhéologie est définie comme la science qui étudie la déformation et l'écoulement de la matière sous l'effet des contraintes appliquées. En fait, la rhéologie est une extension des disciplines fondamentales telles que la résistance des matériaux et la mécanique des fluides. Il est possible de classer les matériaux en fonction de leurs comportements rhéologiques en matériau à comportement visqueux, élastique ou viscoélastique. Un fluide visqueux peut se déformer de manière irréversible sous l'action d'un effort de cisaillement. Ce type de fluide obéit à la loi de Newton. Par contre, un solide est capable de résister de manière élastique à un tel effort en respectant la loi de Hooke, du moins tant que l'intensité ne dépasse pas un certain seuil. Le comportement viscoélastique linéaire est intermédiaire entre le comportement d'un solide élastique et d'un liquide visqueux.

Avec la tendance actuelle vers l'utilisation de bétons de plus en plus fluides, et par le biais de la rhéologie, les recherches tentent d'évaluer et de prédire par la suite la maniabilité du béton. Le béton peut être décrit comme une suspension de particules de différentes tailles, constitué d'une phase solide et d'une phase liquide. La définition des phases solides et liquides peut varier selon l'échelle de la taille des particules. Par exemple, le gravier (phase solide) et le mortier (phase liquide) ou à une échelle différente, le granulat et de la pâte peuvent être considérés. Lorsque la rhéologie de la pâte est étudiée, l'ensemble des fines (phase solide) baignant dans l'eau (phase liquide) peut être considérée. Ainsi, le comportement rhéologique peut être étudié à différents niveaux : le béton, le mortier, la pâte et le fluide (mélange de l'eau et des adjuvants chimiques).

La section suivante se veut un rappel des principes fondamentaux en rhéologie.

2.5.1 Comportements rhéologiques

Un écoulement se manifeste par le mouvement relatif des constituants adjacents d'un matériau. Dans un écoulement de cisaillement, des couches parallèles imaginaires infiniment minces se déplacent sous l'effet d'une contrainte de cisaillement τ et engendrant un gradient de vitesse $\dot{\gamma}$, qui est désigné sous le nom de taux de cisaillement et est équivalent à la vitesse de variation de la déformation du fluide.

Le comportement d'un matériau peut être caractérisé par différentes manières, le plus souvent par des courbes d'écoulement ou des rhéogrammes qui relient la contrainte de cisaillement et le taux de cisaillement. De nombreux modèles ou lois de comportement reliant τ à $\dot{\gamma}$ ont été développés afin de décrire les comportements rhéologiques les plus couramment rencontrés.

Le cas le plus simple correspond à celui des fluides newtoniens :

$$\tau = \mu \dot{\gamma} \quad (2.7)$$

où μ représente la viscosité du fluide.

Viennent ensuite les fluides dont les propriétés ne dépendent pas du temps. La loi d'Ostwald de Waele ou loi de puissance :

$$\tau = k\dot{\gamma}^n \quad (2.8)$$

Cette loi permet de décrire deux comportements (figure 2.2):

- Comportement rhéofluidifiant caractérisé par un rhéogramme qui a tendance à s'infléchir parallèlement à l'axe de $\dot{\gamma}$ dont la viscosité décroît avec $\dot{\gamma}$ lorsque n est inférieur à 1;
- Comportement rhéoépaississant caractérisé par un rhéogramme qui a tendance à s'infléchir parallèlement à l'axe de τ dont la viscosité croît avec $\dot{\gamma}$ lorsque n est supérieur à 1.

Dans cette classe, il y a aussi les fluides à seuils qui sont caractérisés par une contrainte seuil τ_0 (figure 2.2-a). Si la contrainte appliquée reste inférieure à cette valeur critique, le matériau se comporte comme un solide et ne s'écoule pas. Dans le cas contraire, le matériau retrouve le comportement d'un fluide.

Les deux modèles les plus utilisés sont ceux de :

- Bingham :

$$\begin{cases} \tau = \tau_0 + \eta_p \dot{\gamma} & \text{si } \tau > \tau_0 \\ \dot{\gamma} = 0 & \text{si } \tau \leq \tau_0 \end{cases} \quad (2.9)$$

- Herschel-Bulkley :

$$\begin{cases} \tau = \tau_0 + k\dot{\gamma}^n & \text{si } \tau > \tau_0 \\ \dot{\gamma} = 0 & \text{si } \tau \leq \tau_0 \end{cases} \quad (2.10)$$

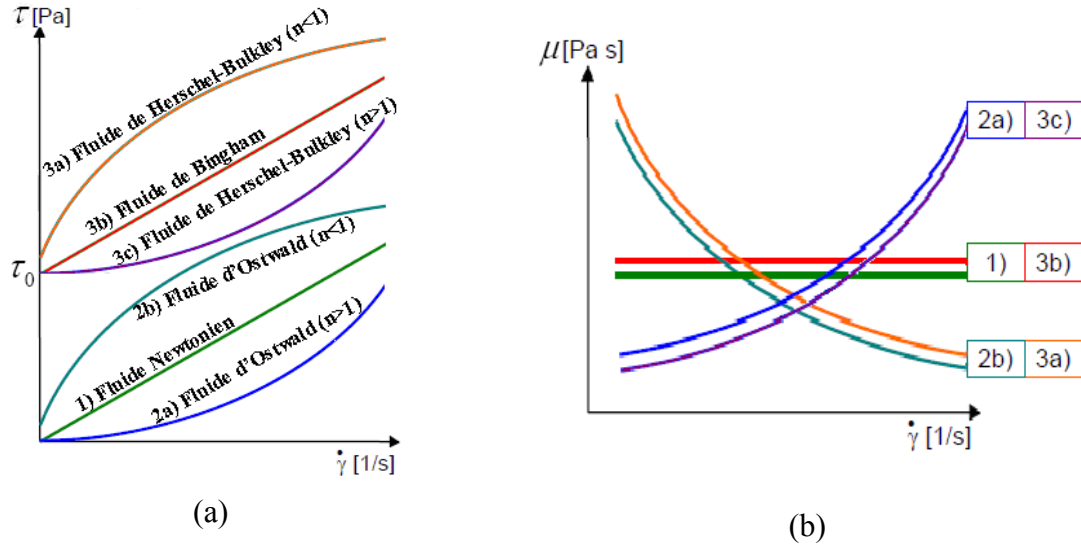


Figure 2.4 Lois de comportements élémentaires

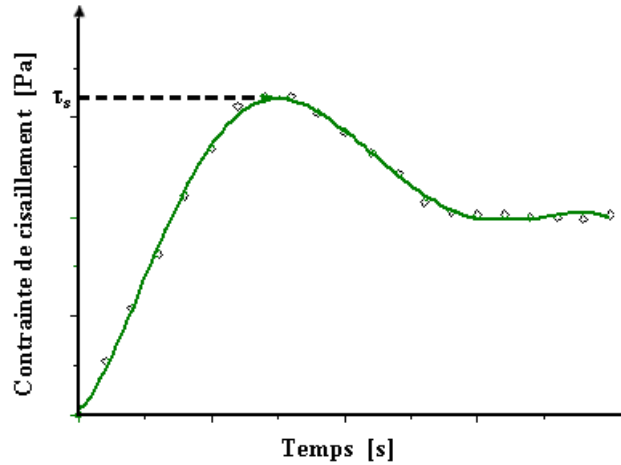
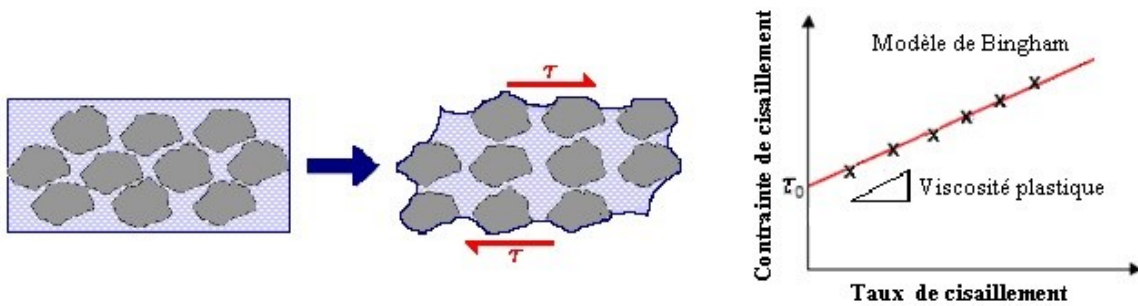
2.5.2 Grandeurs rhéologiques

Les grandeurs rhéologiques principales qui caractérisent le comportement rhéologique d'un béton frais sont le seuil de cisaillement (τ) et la viscosité (μ).

2.5.2.1 Seuil de cisaillement

Il existe deux types de seuil de cisaillement (τ) qui peuvent être liés au béton, au mortier et à la pâte de ciment, à savoir le seuil de cisaillement statique (τ_s) et le seuil de cisaillement dynamique (τ_0) [Wallevik, 2003]. Le τ_s correspond à la contrainte à fournir afin d'obtenir le premier signe d'écoulement, c.-à-d. la transformation de l'état solide à un état viscoélastique. Il peut être déterminé en imposant, à une suspension vierge de toute sollicitation, une contrainte croissante jusqu'à la valeur provoquant l'écoulement de la suspension (figure 2.3).

Tandis que le τ_0 est plus responsable de l'arrêt d'écoulement, c.-à-d. la transformation d'un état viscoélastique à un état solide. Il correspond à une valeur théorique qui découle de l'extrapolation de la courbe d'écoulement à un gradient de vitesse de cisaillement nul (figure 2.4). La méthode de mesure consiste à déstructurer complètement la suspension testée en appliquant un gradient de vitesse suffisamment élevé, d'établir ensuite la courbe d'écoulement et de déduire la valeur de la contrainte à une valeur nulle du gradient de vitesse, à partir de l'équation du modèle.


 Figure 2.5 Mesure de τ_s

 Figure 2.6 Mesure de τ_0

2.5.2.2 Viscosité

La viscosité μ est définie comme la résistance à l'écoulement de la matière. Elle est définie généralement comme étant le rapport entre la contrainte de cisaillement et le gradient de vitesse de cisaillement correspondant :

$$\mu = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad (2.11)$$

La viscosité, μ , est constante dans le cas des fluides newtoniens, puisqu'elle correspond dans ce cas à la pente de la courbe d'écoulement rectiligne. Elle est synonyme de la viscosité apparente, qui est définie, pour un point donné, comme la pente de la droite joignant l'origine au point représentatif considéré. Il existe aussi la viscosité plastique (μ_{pl}) qui est définie comme la pente de la courbe d'écoulement à chaque point. Ainsi, la viscosité plastique, μ_{pl} , d'un fluide de Bingham est une constante puisque la courbe d'écoulement est rectiligne (figure

2.4). Pour un fluide de Herschel-Bulkley, μ_{pl} (pente de la courbe d'écoulement) est la dérivée par rapport au gradient de vitesse de l'équation de la contrainte de cisaillement, elle est donc variable à chaque point de la courbe (figure 2.2-b) :

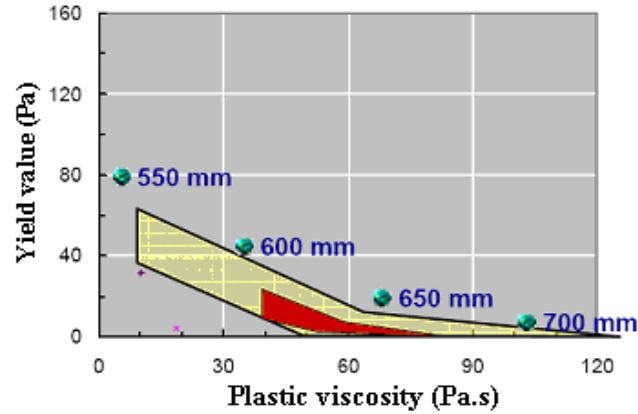
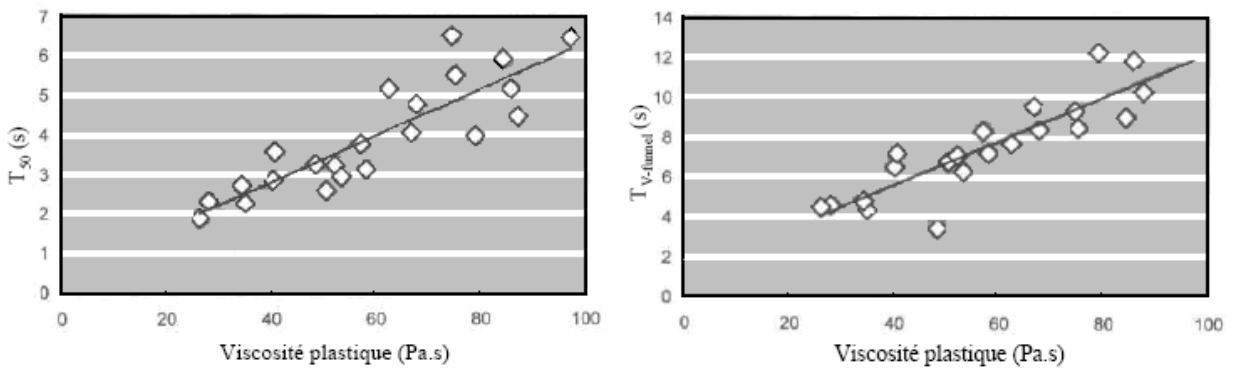
$$\mu_{pl} = n.k\dot{\gamma}^{n-1} \quad (2.12)$$

2.5.3 Corrélations entre les grandeurs rhéologiques et les essais empiriques

Comme il est montré plus haut, la rhéologie d'un béton peut être caractérisée par un minimum de deux ou trois paramètres (selon le modèle de Bingham ou de Herschel-Bulkley). Ainsi, un seul essai ne donnant qu'une seule mesure peut difficilement caractériser adéquatement un béton. L'utilisation d'un seul essai peut être justifiée dans le cas où un seul paramètre rhéologique est variable et que les autres paramètres sont à peu près fixes. Cette dernière hypothèse explique en partie pourquoi l'affaissement au cône d'Abrams a pu être utilisé avec succès malgré sa mesure unique de la maniabilité. Néanmoins, l'introduction des bétons fluides oblige les utilisateurs à tenir compte de toutes les dimensions du béton.

Dans la littérature, certains auteurs ne sont pas tout à fait d'accord que l'essai d'étalement au cône d'Abrams est la seule mesure liée à τ du béton. Il a été noté une faible corrélation entre τ et l'étalement du béton, sans tenir compte de μ_{pl} . Nielsen et coll., [2003] ont présenté des valeurs typiques pour le béton autoplaçant (figure 2.5) où ils ont montré la corrélation entre les mesures d'étalement au cône d'Abrams et les paramètres rhéologiques.

Les corrélations les plus pertinentes qui relient la rhéologie et les essais empiriques sont celles reliant la viscosité (plastique ou apparente) aux grandeurs d'ouvrabilité T_{50} et $T_{V-funnel}$ (temps de passage au diamètre de 50 cm de la galette d'étalement au cône d'Abrams, et le temps d'écoulement à l'entonnoir en V (V-funnel), respectivement). Ainsi, Emborg [1999], Grünwald et coll. [2003], Nielsson et coll. [2003] qui ont utilisé des viscosimètres de type BML confirment ces relations (figure 2.6).

Figure 2.7 Étalement vs. τ et μ_{pl} [Nielsson et coll., 2003]Figure 2.8 Corrélations viscosité – T_{50} et viscosité – $T_{V-funnel}$ [Nielsson et coll., 2003]

2.5.4 Thixotropie et anti-thixotropie

Certains fluides non newtoniens peuvent avoir un écoulement dont les caractéristiques rhéologiques dépendent des traitements antérieurs. La mesure de cisaillement, et donc la viscosité, peut augmenter ou diminuer avec le temps de cisaillement. Ces changements peuvent être réversibles ou irréversibles. Ces fluides sont définis comme des fluides thixotropiques ou anti-thixotropiques. Si la viscosité est une fonction décroissante de la durée d'écoulement pour un taux de cisaillement constant et que sa structure initiale se régénère après un temps de repos suffisant, il s'agit de la thixotropie. Le rhéogramme issu d'une telle mesure rhéologique présente une boucle d'hystérésis. Le phénomène inverse, qui est le

comportement anti-thixotropique, se traduit par une augmentation de la viscosité apparente avec la durée d'écoulement [Couarraze et coll., 2000].

La thixotropie se produit toujours dans le cas des fluides rhéofluidifiants (dans le sens que la viscosité diminue avec l'augmentation de τ) et l'anti-thixotropie se produit dans le cas des fluides rhéoépaississants [Barnes et coll., 1993].

Les effets de la thixotropie et de l'anti-thixotropie sont illustrés sur la figure 2.7.

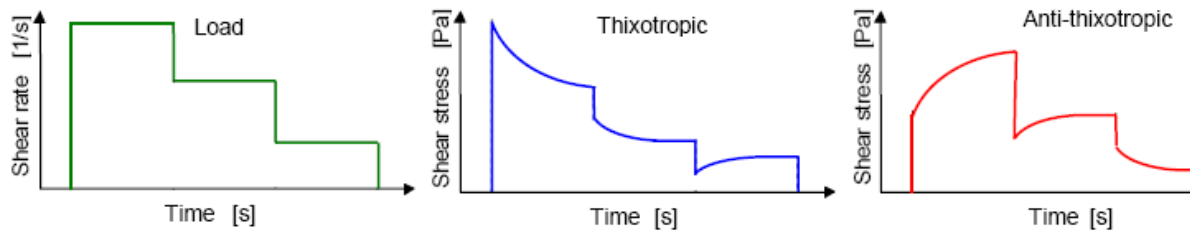


Figure 2.9 Représentation schématique des réponses des matériaux thixotropiques et anti-thixotropiques [Esping, 2007]

2.5.5 Rhéométrie

Par l'intermédiaire de rhéomètres ou viscosimètres, des mesures d'écoulements peuvent être réalisés et qui permettent, à partir de considérations et d'hypothèses sur l'écoulement, de relier les paramètres macroscopiques (couple, vitesse de rotation, débit, etc.) aux paramètres régissant les lois de comportement qui sont en général la contrainte de cisaillement et le gradient de vitesse. Les rhéomètres utilisés dans la pratique peuvent être classés en deux catégories : les rhéomètres capillaires et les rhéomètres rotatifs. Le principe des rhéomètres capillaires est souvent basé sur l'écoulement à travers une conduite sous l'action d'une différence de pression. Les Rhéomètres rotatifs sont constitués de deux surfaces solides coaxiales entre lesquels le fluide est cisailé. Ces surfaces peuvent être de différentes géométries : la géométrie plan-plan, la géométrie cône-plan et la géométrie à cylindres coaxiaux (plus communément appelée géométrie de Couette). Ces rhéomètres permettent de déterminer le comportement d'écoulement : $\tau = f(\dot{\gamma})$. Dans de tels essais, l'échantillon est

soumis à une sollicitation (contrainte ou cisaillement appliqués suivant le type du rhéomètre) constante ou oscillatoire, et la réponse dans les instants qui suivent est étudiée.

Dans cette section, des détails sur les principaux phénomènes indésirables qui peuvent intervenir au cours d'essais d'écoulement ainsi que les précautions à prendre pour limiter leurs effets sur les résultats seront rapportés, suivis d'une description des géométries des rhéomètres les plus utilisées.

2.5.5.1 Phénomènes perturbateurs

Glissement aux parois

Le glissement aux parois est le phénomène le plus couramment rencontré lors de l'étude des suspensions. Il peut se produire dans toutes les géométries d'écoulement et résulte du cisaillement préférentiel d'une fine couche du fluide près des parois. La décroissance naturelle de la concentration solide près d'une paroi lisse, en l'absence d'interactions particulières entre le fluide et la paroi est, en général, à l'origine du glissement [Barnes et coll., 2001; [Hartmann et coll., 2002]. Cela a pour conséquence d'abaisser la viscosité mesurée par rapport à sa valeur réelle.

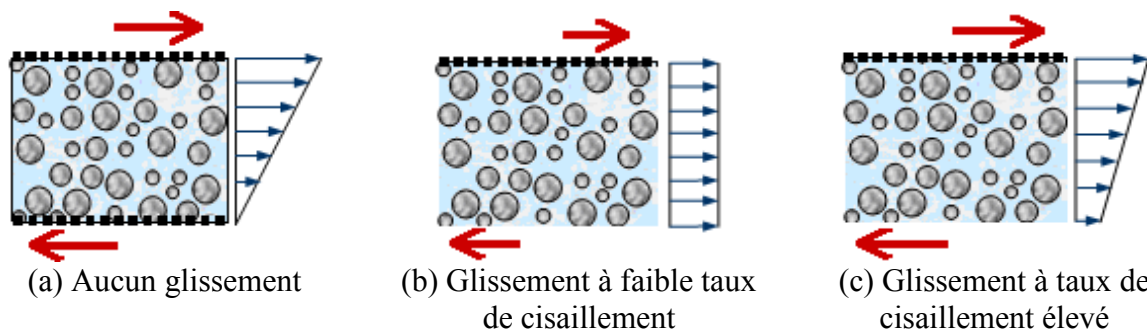


Figure 2.10 Gradient de vitesse dans une couche cisailée [adapté de Benfill et coll., 2000]

Au vu de ces remarques, il semble que la forme de l'interface entre le fluide et la paroi puisse jouer un rôle prépondérant au cours du glissement. En effet, l'application d'une rugosité conduit, en général, à l'éviction ou à la réduction de ce phénomène. La taille et la forme de celle-ci contrôlent son mode d'action. La mise en place d'une rugosité permet de rétablir un profil de concentration massique homogène à l'approche de la paroi. Les particules s'insèrent, en effet, au sein de la rugosité et peuvent être considérées comme fixées à la paroi (figure 2.8).

Ainsi, il est préférable d'utiliser une rugosité dont la taille est au moins égale à celle des plus grosses particules de la suspension. De plus, des écoulements secondaires peuvent apparaître suivant la forme de la rugosité. Pour éviter cela, une surface de rugosité organisée aléatoirement est mieux adaptée [Barnes, 1995].

Fracturation

Le phénomène de fracturation de l'échantillon est analogue à celui du glissement et consiste en l'apparition, sur un plan de cisaillement, d'une discontinuité des profils de vitesse. Comme pour le glissement aux parois, un cisaillement inhomogène est observé, mais cette fois-ci, la surface de discontinuité n'est plus spécifiquement située le long de l'interface outil-échantillon. Comme le glissement, la fracturation a été observée avec des suspensions concentrées et sa présence pourrait être liée à l'existence d'un minimum dans les courbes d'écoulement.

Creusement

Dans les géométries plan-plan et cône-plan et dans certaines conditions, il est possible que la périphérie de l'échantillon initialement droite se déforme vers l'intérieur du matériau en cours d'écoulement. Ce phénomène est connu sous le nom de creusement et s'il est important, il peut engendrer des erreurs de l'ordre de 100% sur les valeurs de la contrainte mesurée pour un gradient de vitesse donnée. Des observations de l'intérieur et de l'extérieur de mélanges eau-argile ont montré que, dans le cas d'un creusement modéré, la suspension n'est pas cisailée dans les deux bourrelets de suspension au contact des outils et situés au-dessus du creux, tandis que le reste du matériau semble correctement cisailé [Coussot, 1992]. En première approximation, il est assumé que l'écoulement se produit dans un volume réduit obtenu en enlevant une épaisseur uniforme à la périphérie du volume théorique; cette épaisseur correspondante à la profondeur du creux. Cette correction est surtout valable dans le cas d'un creusement qui reste modéré.

Évaporation

L'évaporation intervient surtout dans les suspensions lors d'essais comportant une surface libre. Ce phénomène conduit à une diminution du volume étudié. Ceci pourrait se traduire par

une diminution de la viscosité apparente mesurée. D'un autre côté, une augmentation de la concentration massique apparaît, qui se traduit par une augmentation de la viscosité apparente. Par conséquent, il s'agit de la présence d'un phénomène dont les effets sont contradictoires. Il apparaît évident que ce phénomène est d'autant plus important que le rapport des surfaces libres sur le volume du matériau étudié est grand. Les techniques pratiques utilisées pour minimiser les perturbations consistent à travailler sous une atmosphère saturée par le fluide interstitiel ou à placer un film liquide sur les surfaces libres. Il faut, bien entendu, vérifier que la saturation ne modifie pas la concentration massique du matériau et que le film liquide soit très peu visqueux et non miscible avec le matériau.

Sédimentation

La sédimentation est liée à l'action de la pesanteur sur les particules. Elle peut se produire lors de toute expérience réalisée sous l'action de la gravité, ce qui est le cas dans la plupart des essais de rhéométrie. Cela conduit à une accumulation de particules dans la partie basse de la géométrie d'écoulement. Le matériau est donc hétérogène et peut être représenté, de manière simplifiée, par des couches visqueuses superposées de valeurs différentes. Ainsi, les couches supérieures sont moins visqueuses que le matériau initial, cependant, les couches inférieures sont plus visqueuses du fait de l'accumulation des particules. Suivant la géométrie d'écoulement, les effets peuvent être très différents et leur contrôle n'est pas aisé.

2.5.5.2 Géométries de mesures

Géométrie plan-plan

Dans cette géométrie, le fluide est cisailé entre deux disques coaxiaux en rotation à des vitesses différentes (deux disques de rayon R , séparés d'une hauteur H). Le plus souvent, le disque supérieur est mobile à la vitesse de rotation Ω , tandis que le disque inférieur est fixe (figure 2.9-a). Les avantages de cette géométrie résident dans la faible quantité de fluide à utiliser et dans une mise en place et un nettoyage aisés. De plus, l'entrefer (espace entre les deux disques) de cette géométrie n'est pas fixe et peut être réglé à l'épaisseur souhaitée. Cela permet donc d'étudier des matériaux contenant des particules plus grossières. L'inconvénient dans cette géométrie est un gradient de vitesse très hétérogène (nul au centre et maximal à la

périphérie) dans l'échantillon. Néanmoins, il ne faut pas utiliser un trop grand entrefer s'il s'agit de réduire la surface libre, et par conséquent, les effets de bords et le phénomène d'évaporation qui en découlent.

Avec cette géométrie, les effets d'inertie sont négligés. De plus, elle présente l'avantage de transmettre une contrainte constante suivant des tranches parallèles aux disques solides. En théorie, le gradient et la contrainte de cisaillement se définissent par :

$$\dot{\gamma} = \frac{\Omega r}{H} \quad (2.13)$$

$$\tau(\dot{\gamma}_R) = \frac{3C}{2\pi R^3} + \frac{\dot{\gamma}_R}{2\pi R^3} \frac{dC}{d\dot{\gamma}_R} \quad (2.14)$$

où $\dot{\gamma}_R = \Omega R / H$ est le gradient de cisaillement à la périphérie du disque.

Géométrie cône-plan

Dans cette géométrie, le fluide est cisailé entre un plan et un cône tronqué coaxiaux en rotation à des vitesses différentes (figure 2.9-b). En pratique, le cône tronqué est le plus souvent mobile tandis que le plan reste fixe. Son avantage principal réside dans le fait que le gradient de vitesse reste homogène tant que l'angle du cône reste faible (inférieur à 6° environ). De plus, cette géométrie permet de tester de petits volumes de matériau avec une mise en place et un nettoyage aisés. Par contre, son inconvénient majeur est de permettre uniquement des expériences avec des matériaux contenant des particules très fines compte tenu du faible entrefer (espace entre le plan et la troncature du cône). En effet, la présence de particules grossières peut conduire à un blocage à ce niveau. La surface libre, relativement grande par rapport au volume testé, favorise le phénomène d'évaporation.

Dans cette configuration, les effets d'inertie sont négligés et l'angle est supposé petit. Le gradient de vitesse et la contrainte sont considérés comme homogènes à l'intérieur du volume cisailé. Ces valeurs sont donc calculées à partir des mesures de couple et de vitesse de rotation de la manière suivante :

$$\dot{\gamma} = \frac{\Omega}{\tan \alpha} = \frac{\Omega}{\alpha} \quad (2.15)$$

$$\tau = \frac{3C}{2\pi r^3} \quad (2.16)$$

où α est l'angle du cône, $\dot{\gamma}$ est le gradient de vitesse, τ est la contrainte appliquée, C est le couple, Ω est la vitesse de rotation du cône et r est le rayon du cône.

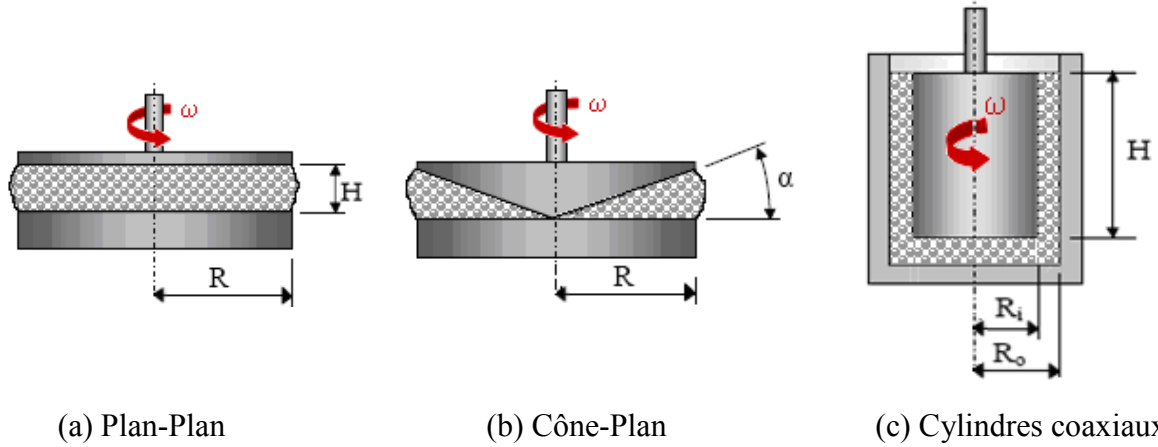


Figure 2.11 Géométries de cisaillement de type Couette [Couarraze et coll., 2000]

Géométrie à cylindres coaxiaux

Cette géométrie est constituée de deux cylindres coaxiaux en rotation relative (figure 2.9-c). Le matériau cisailé dans l'espace est compris entre les deux cylindres, ce qui rend sa mise en place un peu moins aisée que pour les autres géométries ainsi que son nettoyage. Son avantage principal réside dans la possibilité d'étudier des matériaux très fluides, ne pouvant pas rester au sein des géométries planes au cours des essais.

Néanmoins, son inconvénient majeur vient du fait que la distribution des contraintes dans l'entrefer est hétérogène et dépend de la taille de l'entrefer.

La relation reliant le couple à la contrainte s'écrit :

$$\tau = \frac{C}{2\pi r^2 h} \quad (2.17)$$

où h , r et C représentent la hauteur d'immersion du cylindre intérieur, le rayon et le couple, respectivement.

Par conséquent, la contrainte varie de manière proportionnellement inverse au carré du rayon. Donc, plus l'entrefer est large, plus la variation est importante. Il en résulte que le gradient de vitesse n'est pas homogène dans l'intervalle entre les cylindres. Mais, en faisant l'hypothèse que l'espace entre les deux outils est faible ($R_e - R_i \ll R_i$), il vient :

$$\tau \approx \frac{C}{2\pi R_i^2 h} \quad (2.18)$$

et

$$\dot{\gamma} \approx \frac{\Omega R_i}{R_e - R_i} \quad (2.19)$$

où R_i et R_e sont respectivement les rayons intérieur et extérieur, Ω est la vitesse de rotation du cylindre intérieur.

Le cylindre intérieur peut être remplacé par un croisillon constitué de plusieurs pales. Dans ce cas, le rayon est pris comme étant celui du cylindre équivalent. Cette géométrie "vane" limite les effets de glissements, du fait que les contacts fluides parois sont réduits. Elles sont souvent utilisées pour mesurer les propriétés de fluides à seuil.

2.6 EFFET DES AM SUR PROPRIÉTÉS RHÉOLOGIQUES

2.6.1 La cendre volante

L'utilisation des cendres volantes (CV) est généralement connue pour améliorer la maniabilité du béton en réduisant la demande en eau nécessaire pour avoir un certain affaissement ou étalement. En termes de rhéologie, la CV réduit τ mais elle a un effet variable sur μ_{pl} . La maniabilité d'un béton qui contient de la CV est influencée par deux mécanismes contradictoires. Généralement les particules de CV sont plus fines que les particules de ciment qu'elles remplacent, la surface spécifique qui doit être mouillée augmente, ce qui conduit à une diminution de la maniabilité. D'autre part, la forme sphérique des particules de la CV produit un effet de bille qui permet aux plus grosses particules de s'écouler plus facilement en

améliorant ainsi la maniabilité. Il faut noter qu'il y a une différence entre l'effet de la substitution de la CV par masse ou par volume de ciment.

Tattersall [1991] a montré que l'utilisation de la CV dans le béton, par substitution massive du ciment, conduit à une diminution de τ , par contre, μ_{pl} diminue légèrement. L'ampleur de la diminution de τ dépend de la teneur initiale du ciment. L'effet est d'autant plus important que la teneur initiale en ciment est plus faible. Szecsy [1997] a trouvé qu'un remplacement de 10% de CV par masse de ciment dans le béton entraîne une augmentation de τ . De 10 à 20%, l'utilisation de la CV réduit τ (figure 2.10). L'utilisation de 5% de CV conduit à une réduction dans μ_{pl} . Cependant, un remplacement supérieur à 20% entraîne une faible augmentation de μ_{pl} (figure 2.11).

Park et coll. [2005] ont noté une légère augmentation dans τ et dans μ_{pl} avec l'augmentation du taux de remplacement de la CV par masse de ciment dans la pâte de ciment (figure 2.12). Les auteurs ont attribué ces résultats à la forme sphérique des particules de la CV qui réduit les forces de friction entre les particules de ciment. Cet effet est connu sous le nom de « ball bearing effect » [Termkhajornkit et coll. 2001].

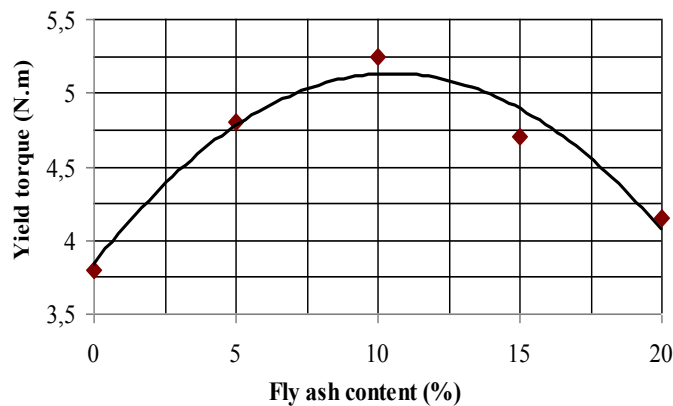


Figure 2.12 Effet du taux de remplacement massique de la CV sur τ [Szecsy, 1997]

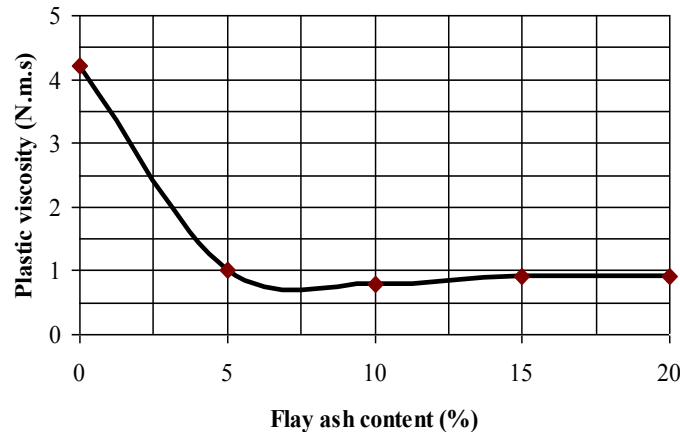


Figure 2.13 Effet du taux de remplacement massique de la cendre volante sur μ_{pl} [Szecsy, 1997]

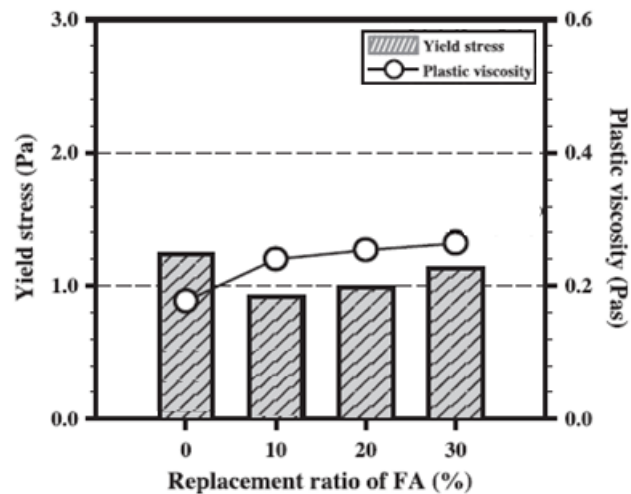


Figure 2.14 Effet du taux de remplacement de la CV sur les propriétés rhéologiques de la pâte de ciment [Park et coll., 2005]

Koehler et coll. [2007] ont utilisé des taux de remplacement par masse de ciment de 10%, 20%, 35% et 55% (55% pour représenter un béton avec un grand volume de CV) dans des bétons contenant deux types de granulats (granulats de rivière et granulats de calcaire concassé). Les auteurs ont trouvé que l'augmentation du taux de substitution de la CV entraîne une réduction dans τ pour les deux types de granulats (figure 2.13-a). Tandis que, pour μ_{pl} , l'effet était variable avec la même tendance pour les deux types de granulats (figure 2.13-b).

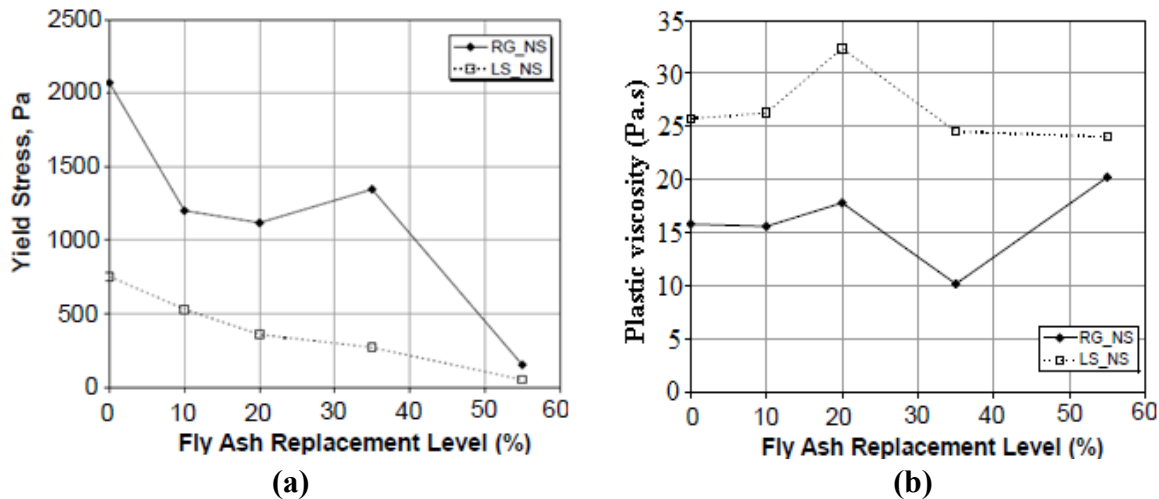


Figure 2.15 Effet du taux de remplacement massique de la CV sur τ [Koehler et coll., 2007]

2.6.2 La fumée de silice

L'utilisation de la fumée de silice (FS) peut améliorer la maniabilité tant qu'elle est utilisée avec de faibles taux de remplacement, mais peut aussi réduire la maniabilité quand elle est utilisée avec des taux élevés. L'addition de 2 à 3% de FS par masse de ciment peut faciliter la pompabilité du béton. Comme la CV, la forme sphérique des particules de la FS est un avantage pour la maniabilité. Cependant, avec un diamètre des particules de FS inférieur à 0.1 μm , la surface spécifique est encore plus importante, ce qui mène à une demande en eau encore plus importante.

Selon Tattersall [1991] et Mork [1996], il existe un seuil de remplacement de la FS dans le béton, de sorte que si le taux de remplacement est en dessous de ce seuil, la μ_{pl} du béton diminue avec un faible changement dans τ . Au-delà de ce seuil de remplacement, τ et μ_{pl} augmentent significativement avec l'augmentation du taux de remplacement.

Il faut toutefois noter que, selon les études de Juvas [1990] et Gjorv [1991], le remplacement partiel du ciment par de la FS entraîne une meilleure dispersion des particules, en diminuant μ_{pl} du mélange, sans grande influence sur τ . Cela reste vrai tant que la concentration en FS reste inférieure à une valeur seuil qui dépend de la teneur en ciment (figure 2.14). Certains ajouts ne sont cependant pas neutres vis-à-vis du superplastifiant (adsorption d'une partie de

l'adjuvant) et de l'eau de gâchage (demande initiale en eau supérieure à celle du ciment). Un remplacement d'une partie trop importante du ciment peut mener à une diminution de la fluidité du mélange.

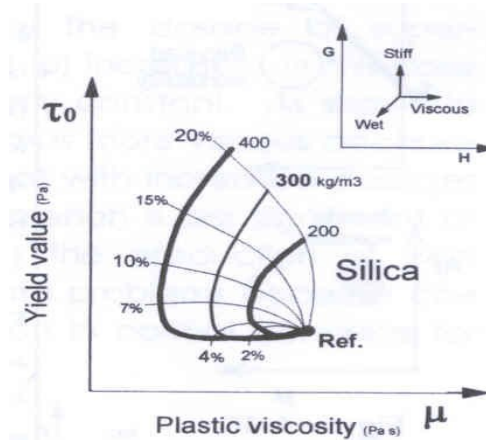


Figure 2.16 Effet du remplacement de la FS sur le comportement rhéologique du béton [Gjorv, 1991]

Shi et coll. [2002] rapportent que l'utilisation de la FS dans le mortier comme substituant de ciment conduit à une réduction de τ et de μ_{pl} à des taux de remplacement en dessous de 6% à 9%, respectivement. À des taux plus élevée (12%), τ et μ_{pl} deviennent plus importants que ceux du mélange de référence (figure 2.15).

D'autres auteurs ont utilisé des taux de remplacement de 5, 10 et 15% par masse de ciment sur des pâtes de ciment et ont constaté que μ_{pl} et τ sont grandement affectés par l'augmentation de la teneur en FS (figure 2.16) [Park et coll., 2005]. Ces résultats sont attribués à la grande surface spécifique de la FS. En plus, les particules de la FS sont réactives, facilitant l'adsorption des molécules de superplastifiant [Nehdi et coll., 1998; Kucharska et coll., 1994].

2.6.3 Le laitier de haut fourneau

Généralement, l'utilisation du laitier de haut fourneau (LHF) améliore la maniabilité. Ses effets peuvent être variables selon des caractéristiques du mélange de béton dans lequel il est utilisé. Selon Tattersall [1991], pour un affaissement constant, l'effet du LHF sur la maniabilité est moins important que l'effet de la CV. De plus, ces résultats montrent que

l'effet de LHF sur la rhéologie dépend fortement de la teneur en ciment et du type de LHF. Pour une faible teneur en ciment (200 kg/m^3), l'addition du LHF diminue τ et augmente μ_{pl} pour des taux de remplacement de 40% et 70%. À une teneur plus élevée en ciment (400 kg/m^3), un taux de remplacement de 40% de LHF a eu un faible effet sur les variations des grandeurs rhéologiques. Tandis que, le taux de remplacement de 70% a entraîné une augmentation de τ et de μ_{pl} .

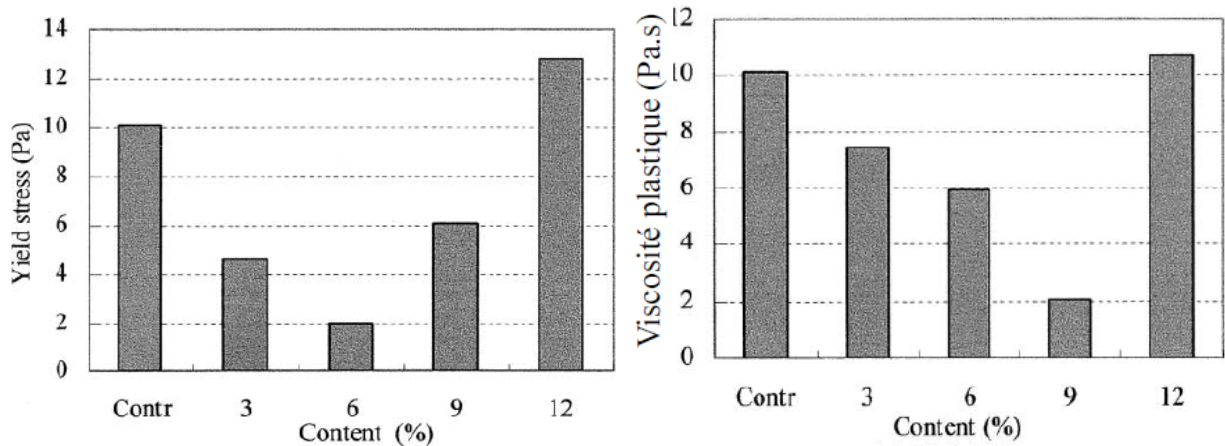


Figure 2.17 Effet du remplacement de la FS sur le comportement rhéologique du mortier [Shi et coll., 2002]

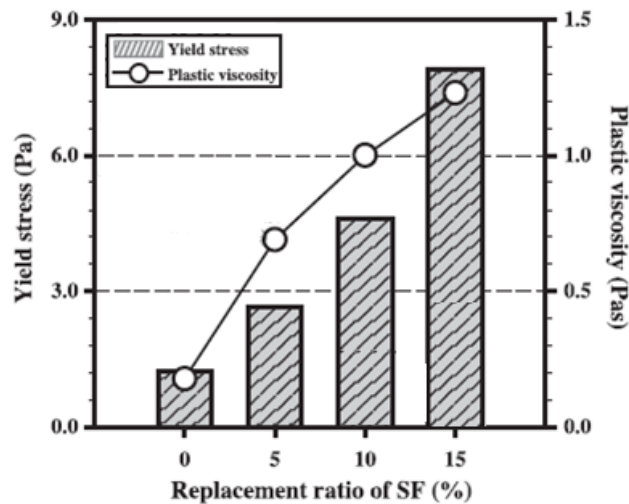


Figure 2.18 Effet du taux de remplacement de la FS sur les propriétés rhéologiques des pâtes de ciment [Park et coll., 2005]

Park et coll. [2005] ont étudié l'effet de taux de remplacement du LHF de 15 à 45% par masse de ciment sur les propriétés rhéologiques des pâtes de ciment. Les auteurs ont trouvé que τ diminue avec l'augmentation du pourcentage de substitution jusqu'à 30%, puis augmente à 45% de remplacement. Néanmoins, μ_{pl} diminue avec l'augmentation du pourcentage de remplacement (figure 2.17).

D'autres études sont menées par Koehler et coll. [2007] sur des bétons avec des pourcentages de remplacement du LHF de haut fourneau de 20, 35 et 50% par masse de ciment. Les chercheurs ont trouvé que τ augmente avec l'utilisation du LHF. Également, en augmentant la teneur en LHF, le seuil baisse mais reste supérieur à celui du béton de référence (figure 2.18). Une diminution a été notée dans μ_{pl} (figure 2.19).

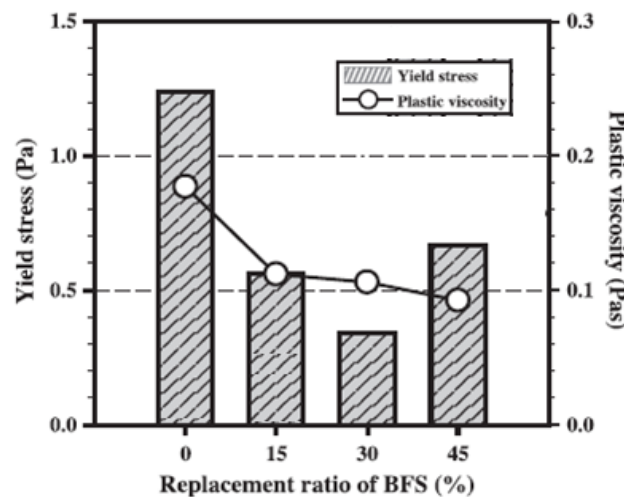


Figure 2.19 Effet du taux de remplacement du LHF sur les propriétés rhéologiques des pâtes de ciment [Park et coll., 2005]

2.6.4 Les ciments ternaire

Park et coll. [2005] ont étudié l'influence des systèmes ternaires sur les propriétés rhéologiques des pâtes de ciment. La figure 2.20 montre la variation de τ et μ_{pl} en fonction du système ternaire "ciment-LHF-FS". Dans les zones riches en LHF, τ et μ_{pl} augmentent avec l'augmentation du pourcentage de la FS. Tandis que pour les zones riches en FS, τ et μ_{pl} diminuent avec l'augmentation du pourcentage en LHF. Le long de la diagonale du point d'origine "0", l'augmentation des pourcentages du LHF et de la FS entraîne une faible augmentation au niveau de τ .

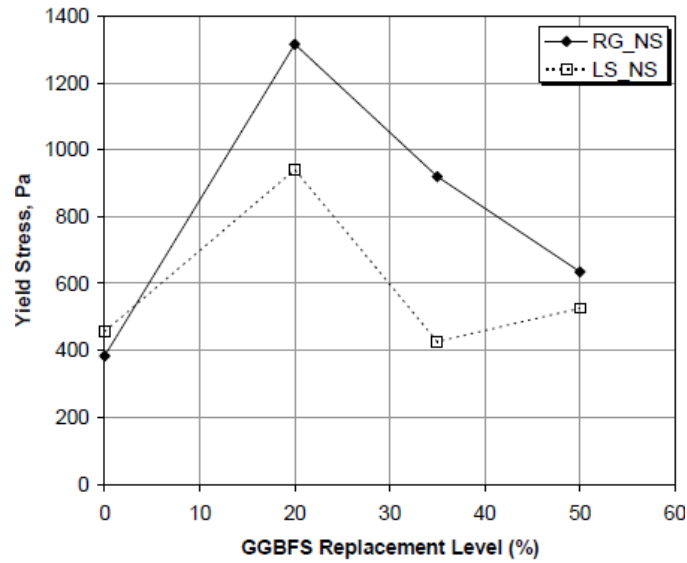


Figure 2.20 Effet du taux de remplacement massique du LHF sur τ [Koehler et coll., 2007]

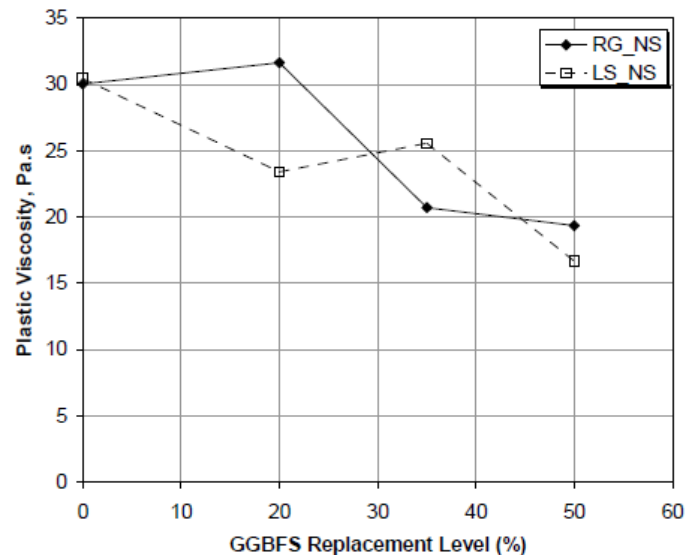


Figure 2.21 Effet du taux de remplacement massique du LHF sur μ_{pl} [Koehler et coll., 2007]

Dans ce système, les particules très fines de la FS remplissent l'espace entre les particules de ciment et de LHF tout en adsorbant le superplastifiant. Ceci réduit les forces de frictions entre les particules des matériaux cimentaires [Kucharska et coll., 1994].

La figure 2.21 montre la variation de τ et de μ_{pl} en fonction du système ternaire "ciment-CV-FS". Dans ce système, la FS affecte fortement les propriétés rhéologiques. Pour toutes les

régions, τ et μ_{pl} augmentent significativement en comparaison avec le système "ciment-LHF-FS".

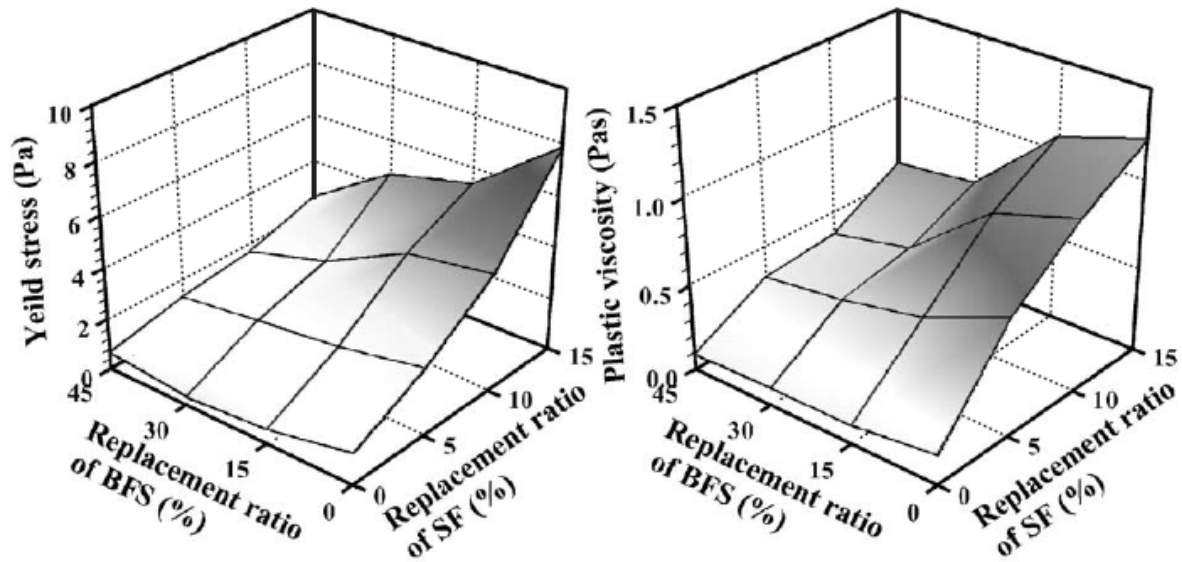


Figure 2.22 Effet de la combinaison "LHF-FS" sur la rhéologie des pâtes de ciment
[Park et coll., 2005]

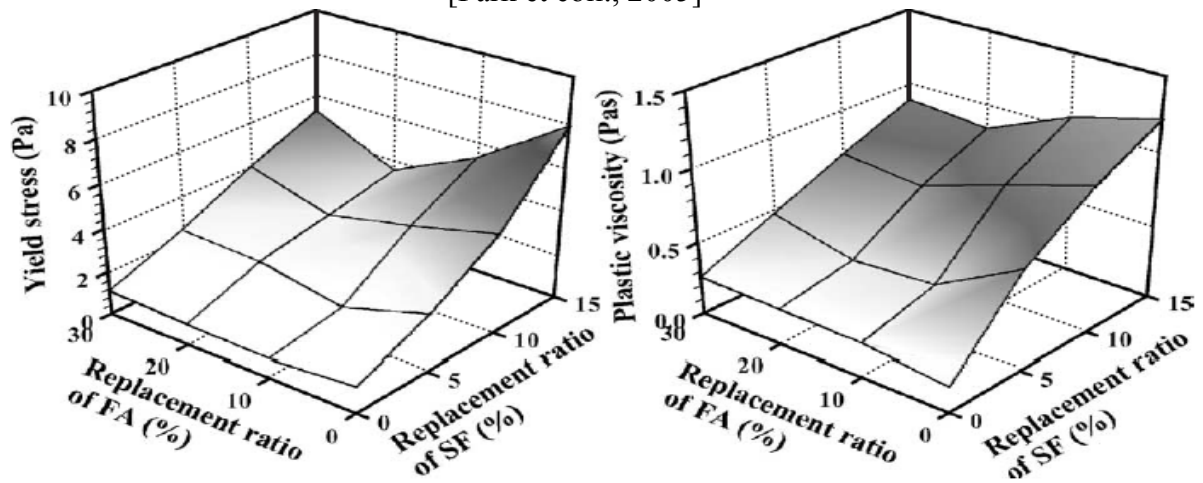


Figure 2.23 Effet de la combinaison "CV-FS" sur la rhéologie des pâtes de ciment
[Park et coll., 2005]

2.7 ADJUVANTS CHIMIQUES ET LEURS INTERCATIONS AVEC LE CIMENT

Il s'agit d'évoquer les caractéristiques des principaux adjuvants chimiques utilisés dans la conception des bétons fluides qui sont les superplastifiants (SP) et les agents de viscosité (AV).

2.7.1 Les superplastifiants

Les SP sont utilisés pour atteindre une certaine fluidité de la pâte de ciment ou pour contrer une diminution de l'eau de gâchage afin d'obtenir des résistances mécaniques élevées, ce qui est le cas des bétons à haute performance (BHP). Leur utilisation est aussi dans le but d'améliorer les propriétés rhéologiques du béton, en agissant notamment sur le seuil de cisaillement (τ) et la viscosité (μ) du mélange pour une meilleure mise en place dans le cas des BAP.

Généralement, les SP sont classés en quatre groupes : les polycondensats de formaldéhyde et de mélamine sulfonée (PMS), les polycondensats de formaldéhyde et de naphthalène sulfoné (PNS), les lignosulfonates modifiés (LS) et les autres incluant les esters d'acides sulfoniques, les polyacrylates et les polycarboxylates (PC ou PCE). Dans cette étude, l'attention est portée sur les PNS et les PC. Des exemples de configuration moléculaires sont présentés sur la figure 2.22.

Le PNS est un polymère linéaire légèrement ramifié et très polydisperse avec un groupement sulfonate sur presque chaque monomère. Il est fabriqué par sulfonation du naphthalène suivie d'une polymérisation par condensation avec le formaldéhyde [Ramachandran et coll., 1998]. Les PNS ont une masse moléculaire relativement faible. L'efficacité du PNS dépend entre autre du nombre de condensation où l'effet dispersant commence à partir de $n = 5$ avec le pouvoir maximal de dispersion pour des masses moléculaires élevées entre 1000 et 20000 [Flatt et coll., 2012]. La masse moléculaire optimale pour un PNS dépend du type de ciment utilisé. Pour un ciment à teneur élevée en alkali, le PNS avec une masse moléculaire élevée s'avère plus efficace [Kim et coll., 1999].

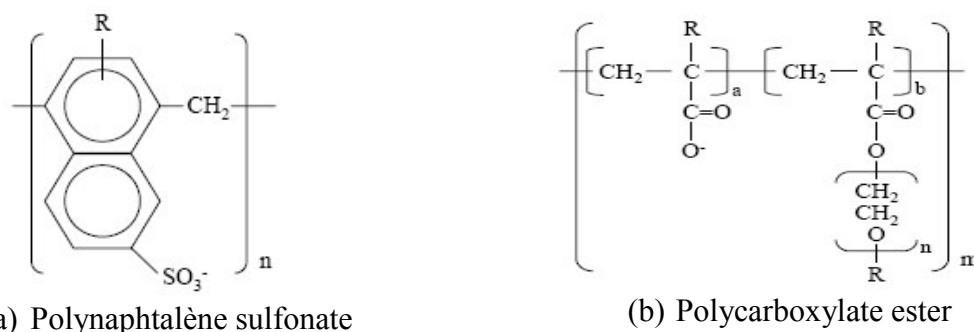


Figure 2.24 Représentation schématique de la structure moléculaire du PNS et PCE
[Ramachandran et coll., 1998]

Les PC sont une nouvelle génération de SP. Ils s'agissent soit d'homopolymères ou des copolymères produits généralement par polymérisation radicalaire des monomères portant des acides carboxyliques sur laquelle sont greffées, par l'intermédiaire d'une liaison ester (COO^-), des chaînes latérales. La structure du polymère auquel des chaînes latérales sont connectées d'une manière plus ou moins régulière ressemble à un peigne lorsque c'est représenté en deux dimensions. Les PC se distinguent des autres types de SP par leur grande efficacité puisque les dosages sont de deux à trois fois plus faibles que ceux en PNS pour atteindre la même consistance du béton.

Grâce à leurs mécanismes d'action, les SP agissent soit par répulsion électrostatique (PNS) ou par effet stérique combiné avec la répulsion électrostatique (PC), la fluidité des mélanges est augmentée avec la dispersion des particules solides (figure 2.23). Par ailleurs, Blask et coll. [2003] ont comparé l'effet stérique des PC à la répulsion électrostatique des SP à base de sulfonates. Ils ont montré que les SP (PNS, PMS et LS) possèdent une influence importante sur le potentiel zêta de la suspension, tandis que les SP à base de polycarboxylate (PCE1, PCE2 et PCE3) tendent à ramener le potentiel zêta à zéro (figure 2.24). Ce phénomène est expliqué par le fait que ces SP protègent les particules de ciment contre les champs électriques, évitant une répulsion électrostatique. Ainsi, seule la répulsion d'origine stérique est active.

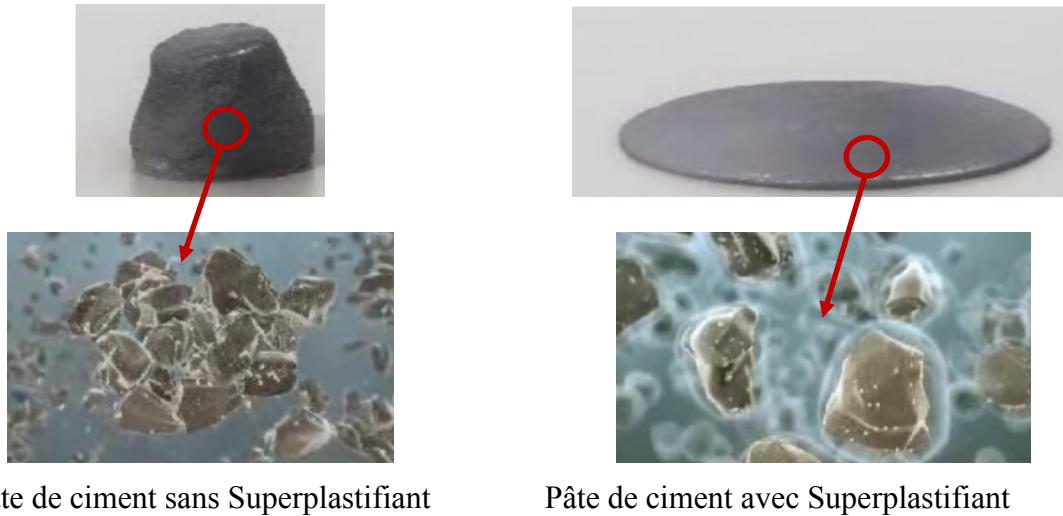


Figure 2.25 Effet dispersant des superplastifiants [LAFARGE, 2007]

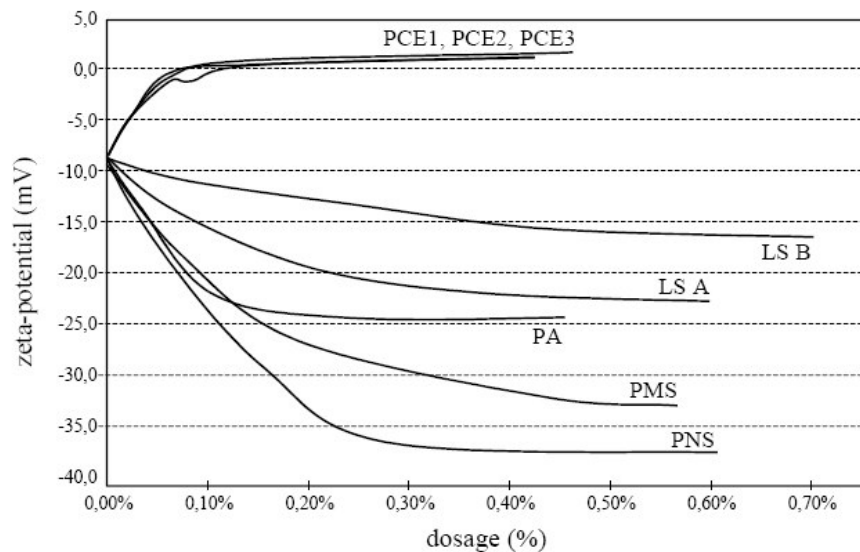


Figure 2.26 Variation du potentiel zêta en fonction du dosage en superplastifiant [Blask, 2003]

2.7.1.1 Adsorption des SP

Plusieurs recherches ont montré que les polymères sulfonés s'adsorbent préférentiellement sur la phase interstitielle du ciment [Hanna et coll., 1989; Hanehara et coll., 1999; Vernet et coll., 1992; Yoshioka et coll., 2002]. Ramachandran et coll. [1998] ont étudié l'adsorption du PNS sur les phases pures du ciment (C_3S , C_3A et C_4AF) et il paraît clairement que le PNS s'adsorbe

préférentiellement sur les phases des aluminates et très peu sur le C_3S (figure 2.25). Cette préférence est dû au fait que les aluminates présentent des charges de surface positives alors que la phase des silicates présentent des charges de surface négatives [Yoshioka et coll., 2002].

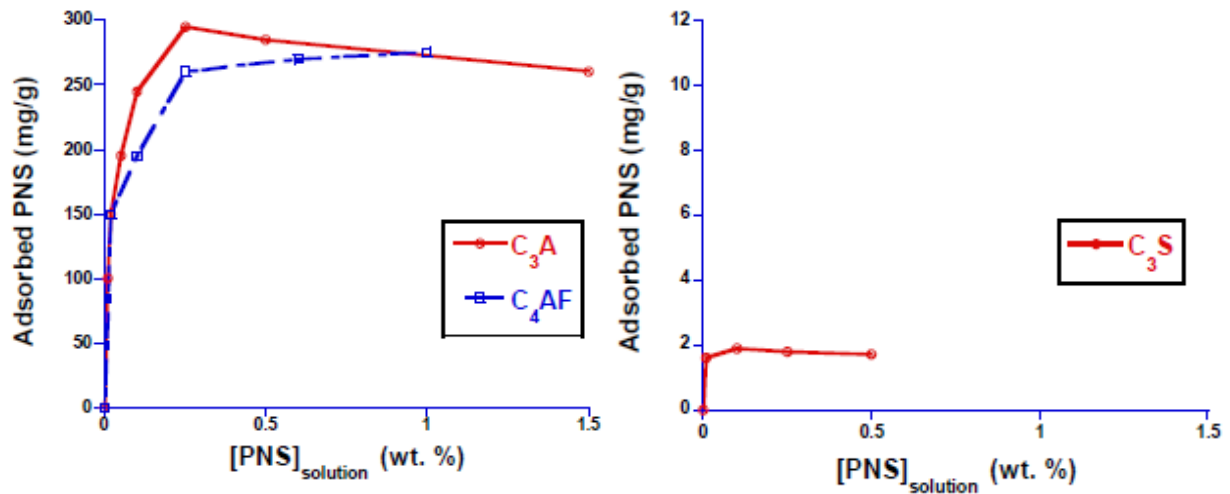


Figure 2.27 Isothermes d'adsorption d'un PNS sur les phases pures de ciment, eau/solide = 0,5
[Ramachandran et coll., 1998]

La nouvelle génération des PC agissent généralement par effet stérique couplé avec la répulsion électrostatique. La chaîne principale du PC joue un rôle prépondérant dans la répulsion électrostatique alors que les chaînes latérales sont responsables de l'effet stérique. Dû à la différence de la charge de surface des phases hydratées, le PC se trouve en compétition avec les ions de sulfates et s'adsorbe principalement sur la phase des aluminates (figure 2.26).

La teneur du ciment en sulfate alcalin est très importante pour les deux types de SP mais l'est encore plus dans le cas des PNS. En effet, pour une teneur faible en sulfates alcalins, le PNS est complètement consommé initialement ce qui provoque une perte rapide de la fluidité. Par contre, lorsque le PNS n'est pas complètement consommé, la quantité restante en solution continue progressivement à s'adsorber sur les nouvelles phases hydratées du ciment ce qui procure un maintien de la fluidité [Kim et coll., 2000].

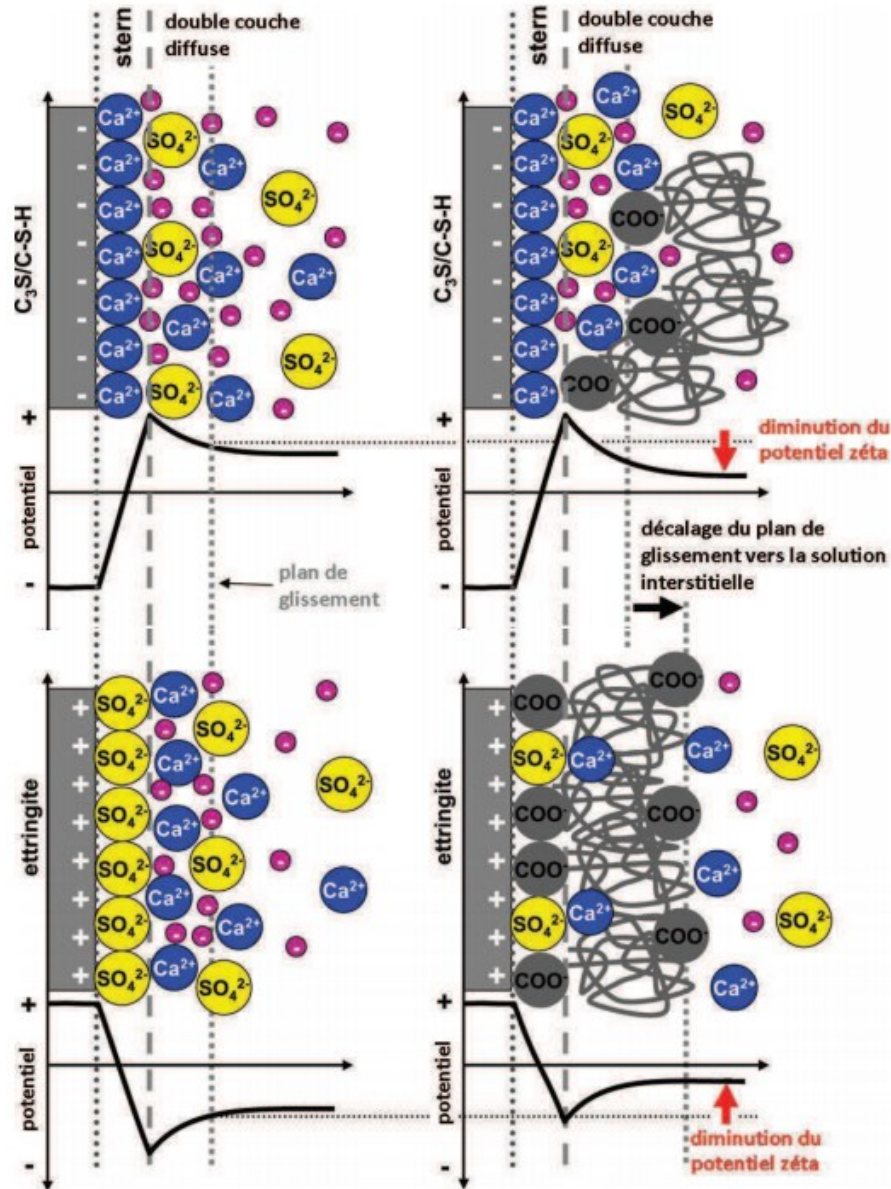


Figure 2.28 Adsorption des ions et des polycarboxylates sur les phases hydratées du ciment

Flatt et coll. [2001] expliquent que le SP ajouté dans une suspension de ciment est divisé en trois parties : Une première partie du polymère est consommée par intercalation lors d'une co-précipitation avec les phases AFt et des C-S-H, formant une phase organo-minérale. Cela signifie qu'une partie du polymère ne sera plus utile comme SP après cette première précipitation, ce qui modifie la rhéologie. Une addition retardée du SP peut réduire cette consommation. La deuxième partie des polymères est disponible pour l'adsorption sur la

surface des grains de ciments. Elle est effective dans la dispersion des particules. Toutefois l'analyse de la quantité adsorbée à la surface des grains n'est pas évidente car les méthodes d'analyse actuelle mesure la quantité de polymère non adsorbée et donc ne différencie pas entre le polymère adsorbé et le polymère intercalé. Enfin, la dernière partie de polymère n'est pas adsorbée et reste dans la phase aqueuse. Cette fraction de polymère peut jouer un rôle dans la dispersion des grains de ciment et aussi dans la lubrification de leurs contacts lors de leur mise en écoulement. Par conséquent, le dosage du SP doit être suffisant pour permettre à une quantité de SP de rester disponible dans la solution interstitielle, contribuant à obtenir une fluidité plus grande, et qui dure plus longtemps avant le début de prise de la suspension.

Palacios et coll. [2012] ont étudié l'adsorption de différents SP sur les particules des ciments composés contenant différents pourcentages en AM. Les auteurs ont trouvé que le ciment contenant 10% de FS consomme du PNS et du PMS d'une façon significative due à la finesse de la FS où le plateau d'adsorption n'a pu être atteint même à 40 mg de polymer/g d'addition. Par ailleurs, il s'avère le ciment contenant 30% de filler calcaire présente une affinité considérable avec le PC en comparaison avec le PNS ou encore le PMS alors que celui qui contient 30% de CV semble présenter une meilleure affinité avec le PMS.

L'interaction entre le ciment et le SP est un phénomène complexe qui dépend non seulement des phases du ciment mais aussi du type de ciment, la finesse des particules ainsi la morphologie de la surface des grains.

2.7.1.2 Les propriétés rhéologiques en présence des SP

Pour un rapport E/C et une teneur en eau donnés dans le béton, l'action dispersante des SP augmente la maniabilité du béton, en augmentant l'affaissement tout en conservant sa cohésion (figure 2.27). Un tel béton peut être mis en place avec peu ou pas de serrage et n'est sujet ni au ressuage excessif ni à la ségrégation [Neville, 2000].

Golaszewski et coll. [2004] ont étudié l'effet du type et du dosage en SP sur les propriétés rhéologiques des mortiers. Les auteurs ont trouvé que les SP à base d'acide polycarboxylates (PA) sont plus efficaces que les SP à base de PNS. Les figures 2.28 et 2.29 montrent que pour un dosage inférieur, les SP-AP peuvent donner des mortiers avec une réduction considérable

en seuil de cisaillement (yield value g), une perte d'ouvrabilité moins élevée et une viscosité plastique h plus élevée. Selon les auteurs, la valeur élevée de cette dernière (h) est avantageuse par rapport à la ségrégation car la stabilité des BAP dépend de h plus élevée.

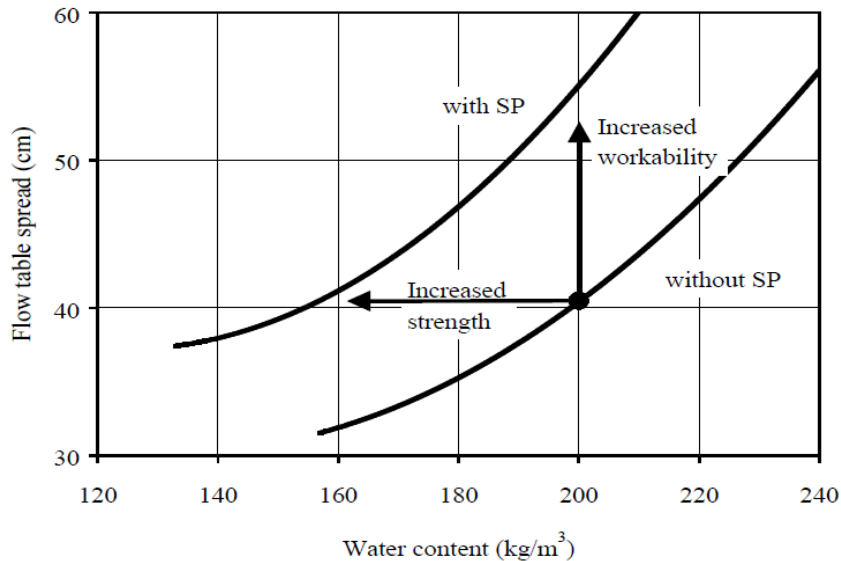


Figure 2.29 Relation entre l'étalement et le dosage en eau d'un béton avec et sans SP [Neville, 2000]

Tattersall [1999] a présenté aussi des résultats montrant que l'addition des SP provoque une augmentation de la μ des bétons qui ont une teneur faible en sable (rapport sable/granulats, $S/G = 0,35$). Cependant, pour les bétons qui ont une teneur élevée en sable ($S/G = 0,45$), μ diminue. Tattersall et coll. [1983] suggèrent qu'à une teneur faible en sable, la pâte de ciment floculée sépare les grosses particules. En conséquence, quand la pâte de ciment est défloculée, les grosses particules se rapprochent davantage, ce qui génère une plus grande résistance à l'écoulement. Le résultat est donc une augmentation de μ_{pl} du béton en dépit d'une diminution de μ de la pâte de ciment. Dans les mélanges avec une teneur élevée en sable, le sable remplit mieux l'espace entre les grosses particules. Il en résulte, une diminution de μ_{pl} de la pâte de ciment qui est une conséquence de la diminution de μ du béton, car les grosses particules ne sont pas suffisamment rapprochées pour donner une grande résistance à l'écoulement.

Billberg et coll. [1996] ont étudié des bétons avec S/G de 0,57 avec deux types de SP : l'un à base de PMS et l'autre à base de PNS. Ils ont constaté pour les deux types de SP une

diminution dans τ et μ_{pl} . La diminution dans τ était de 600 Pa à approximativement 100 à 200 Pa. Toutefois, μ_{pl} a diminué de 30 Pa.s à approximativement 15 à 20 Pa.s.

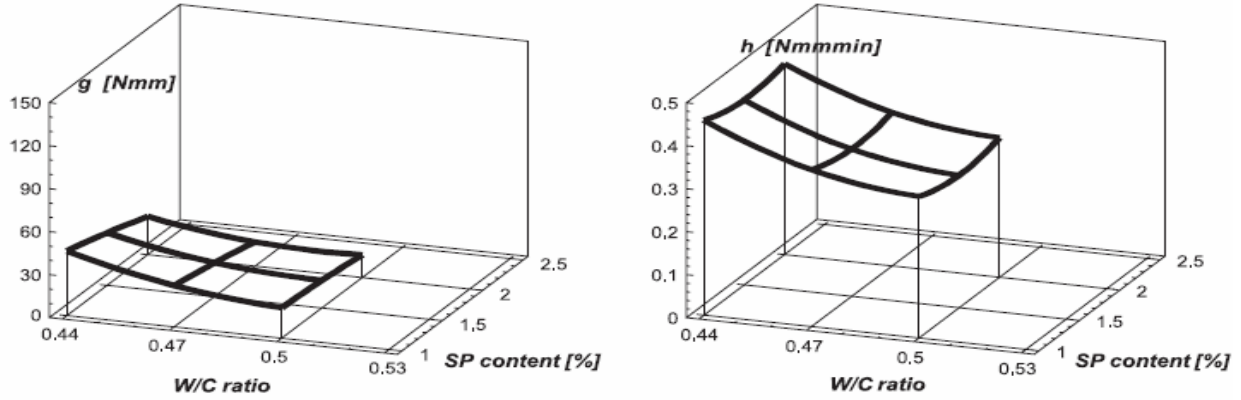


Figure 2.30 Influence du rapport E/C et du SP-PA sur les propriétés rhéologique du mortier (à 20 °C) [Golaszewski et coll., 2004]

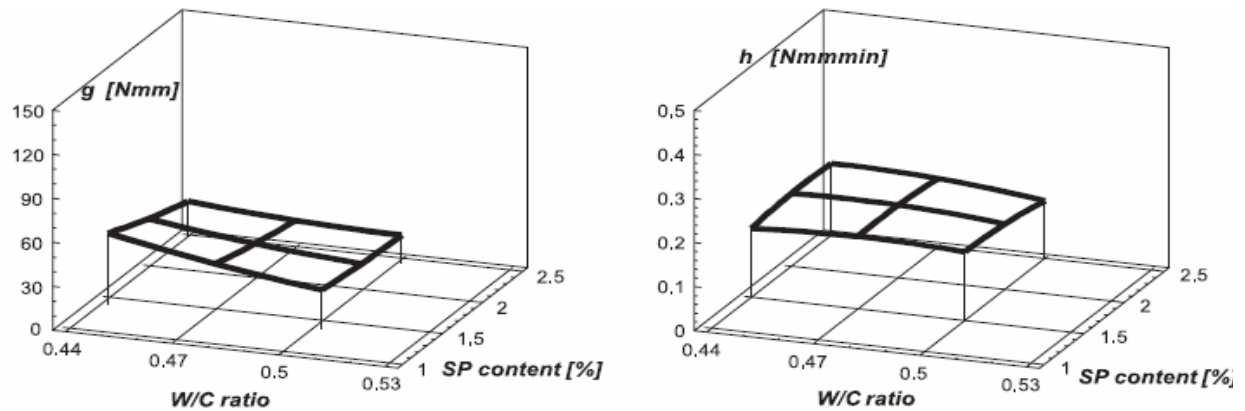


Figure 2.31 Influence du rapport E/C et du SP-PNS sur les propriétés rhéologique du mortier (à 20 °C) [Golaszewski et coll., 2004]

2.7.2 Effet des agents de viscosité

L'ajout de SP permet donc de contrôler les propriétés rhéologiques des ciments. Cependant, leur utilisation dans des suspensions réactives comme le ciment n'est pas si simple. Tout d'abord, il peut y avoir une sédimentation des particules bien dispersées. Cette sédimentation entraîne un ressuyage qui peut être dramatique dans la construction. Ce problème peut être

résolu soit en augmentant la viscosité du milieu dispersant (par l'ajout de polymère comme l'amidon), ou bien en gardant un gel de particules suffisamment fort pour qu'il résiste à son propre poids.

Les agents de viscosité ou agents colloïdaux (AV ou AC) sont des polymères viscosants couramment utilisées dans plusieurs industries comme alimentaire et pharmaceutique. Les AV sont des polymères hydrophiles qui ont une masse moléculaire élevée. Ils ont un effet physique en adsorbant des molécules d'eau ce qui diminue l'eau libre du système. Les principaux groupes de polymères utilisés dans le domaine des systèmes cimentaires sont [Khayat et coll., 2012]:

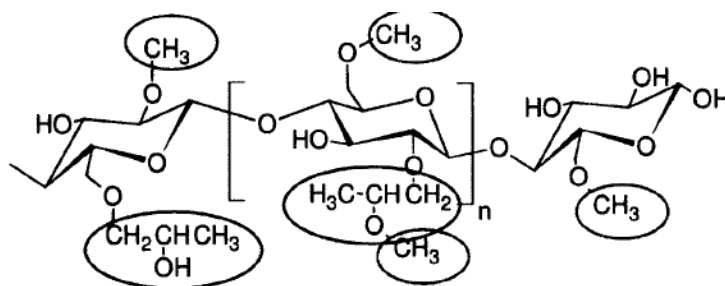
1. Les polymères naturels incluant l'amidon, la gomme de Welan, gomme de xanthane et des protéines végétales;
2. Les polymères semi-synthétiques entre autres l'amidon modifié et ses dérivés et le cellulose-éther et ses dérivés;
3. Les polymères synthétiques comme l'Oxyde de polyéthylène, les polyacrylates et l'alcool polyvinylique.

Les AV les plus utilisés dans le domaine des systèmes cimentaires sont les dérivés de cellulose-éther et les polysaccharides d'origine microbienne comme la de welan et la gomme de Diutan (figure 2.30).

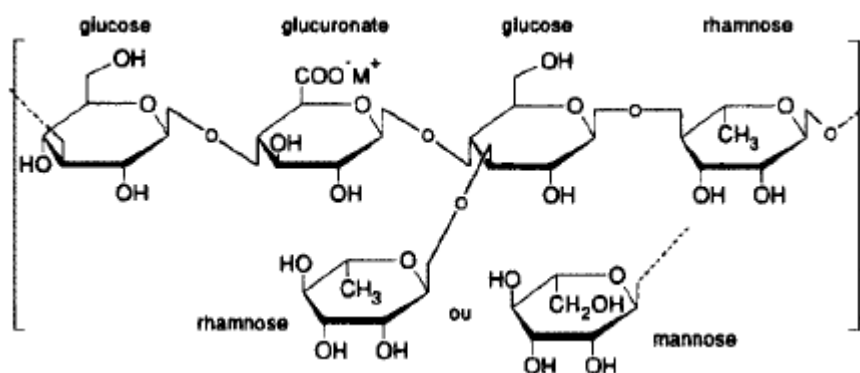
Khayat et coll. [2012] ont rapporté que les AV contribuent à augmenter la viscosité des systèmes cimentaires par le biais de divers phénomènes physico-chimiques dépendamment du type et de la concentration du polymère utilisé (figure 2.31) :

- 1) Rétention d'eau : les longues chaînes de polymères adhèrent aux molécules d'eau. Ceci piège une partie d'eau et augmente sa viscosité.
- 2) Enchevêtrement et interaction polymère-polymère : les molécules des polymères adjacentes peuvent développer des forces d'attraction qui provoquent la formation d'un gel et conséquemment une augmentation de la viscosité.
- 3) Interaction polymère-particule: l'adsorption des polymères sur les particules entraîne une augmentation dans la taille des particules et une augmentation du à les chaînes de

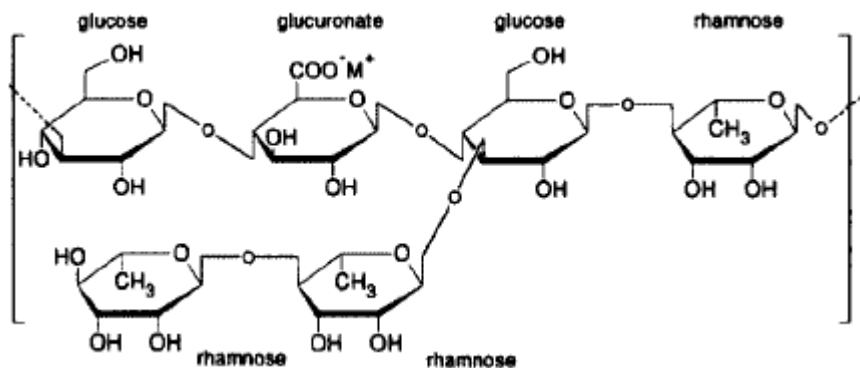
polymère peuvent se chevaucher et s'emmêler spécialement dans des mélanges à forte concentration d'agent de viscosité où le taux de cisaillement est faible. Cet entrelacement augmente la viscosité apparente.



(a) Hydroxypropyle méthyle cellulose (HPMC)



(b) Gomme welan



(c) Gomme diutan

Figure 2.32 Structure moléculaire de (a) Hydroxypropyle méthyle cellulose; (b) gomme welan (c) gomme diutan [Khayat et coll., 2012]

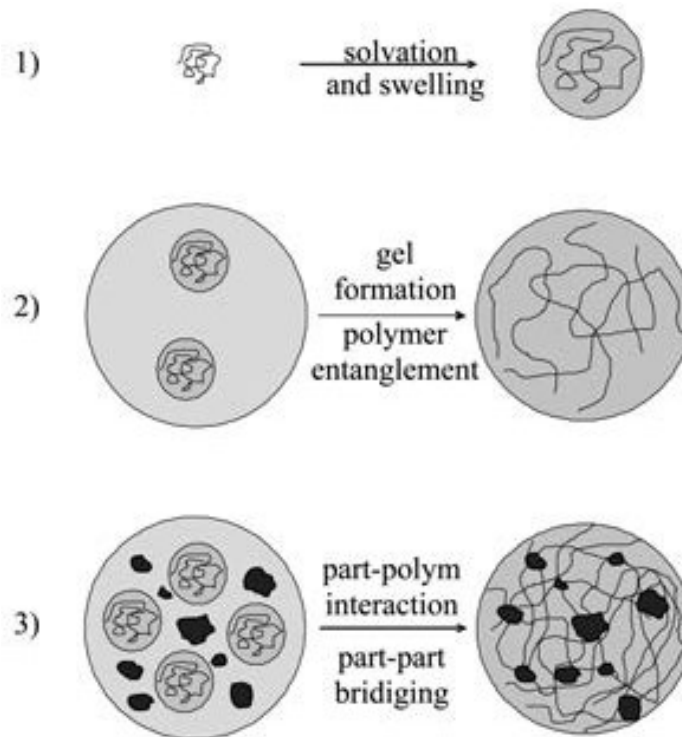


Figure 2.33 Illustration schématique des modes d'action des AV [Khayat et coll., 2012]

2.7.2.1 Adsorption des AV

Tous les types d'AV s'adsorbent d'une manière plus ou moins significative sur les particules du hydraté du ciment. Selon des résultats reportés par Khayat et coll. [2012], il semble que l'hydroxypropyle méthyle cellulose (HPMC) s'adsorbe d'une façon beaucoup moins significative sur les particules hydratées du ciment en comparaison avec la gomme de welan ou la gomme de diutan (figure 2.32). Dans la même référence, les auteurs soulignent que la longue chaîne moléculaire des AV peut s'adsorber à des particules de ciment formant ainsi un pontage qui a pour effet de renforcer l'interaction particule-particule et la formation de groupes où l'eau libre est piégée ce qui s'oppose à la fonction des SP. Par ailleurs, l'utilisation simultanée du SP avec un AV mène à une compétition entre ces deux molécules à s'adsorber sur les grains du ciment. Comme les AV ont une masse moléculaire élevée, leur adsorption excessive

entraîne une floculation et baisse de la viscosité incitant ainsi à la sédimentation des particules [Sharman, 2013].

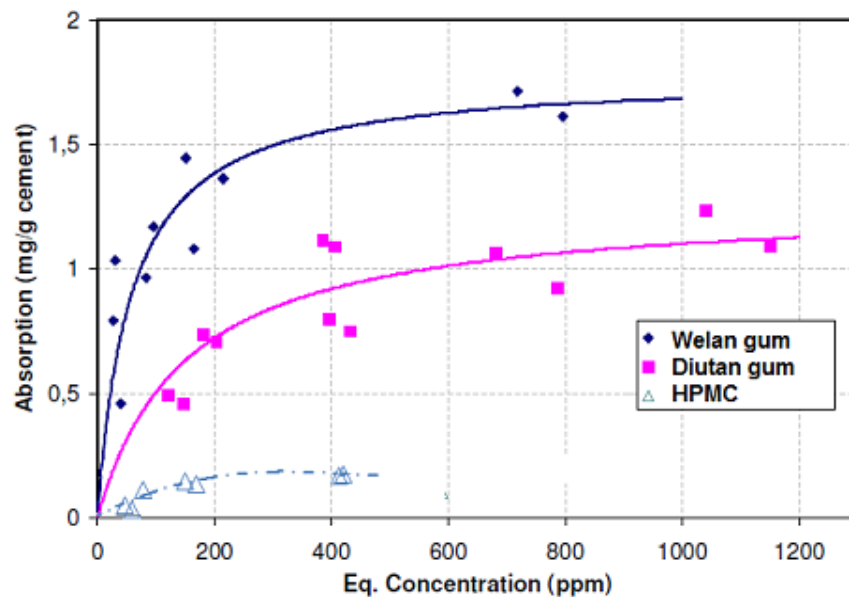


Figure 2.34 Adsorption des AV sur les particules du ciment (E/C = 10) [Khayat et coll., 2012]

2.7.2.2 Les propriétés rhéologiques en présence des AV

Les AV affectent grandement la maniabilité des bétons en les rendant plus collants et visqueux. De plus, à cause de leur thixotropie, les pâtes de ciment contenant de l'AV présentent d'importantes pertes de fluidité avec le temps. Cependant, une maniabilité acceptable peut être retrouvée en re-malaxant le mélange.

Sonebi [2006] a étudié l'effet des AV sur les propriétés rhéologiques des coulis contenant de la CV. L'auteur conclut que l'utilisation de la gomme welan ou de la gomme diutan entraîne une augmentation dans le comportement pseudo-plastique. Deux types d'AV ont fait l'objet de son étude qui sont la gomme welan et la gomme diutan. De plus, quelque soit le dosage en SP les coulis en présence de la gomme diutan ont exposé des seuils des τ_0 et μ_{pl} plus élevés que ceux des coulis en présence de la gomme welan.

Par ailleurs, des signes peuvent indiquer une incompatibilité entre le ciment, SP et l'AV. Mikanovic et coll. [2010] ont tenté de relier l'indice de stabilité des coulis avec l'étalement au mini cône (figure 2.33). Les résultats indiquent que la stabilité des coulis augmente avec la

diminution de la fluidité. Cependant, lorsque la présence de l'AV diminue significativement l'étalement au mini-cône mais que la stabilité est légèrement améliorée ceci peut être un indice d'incompatibilité entre le couple SP-AV. Ceci a été noté avec les deux couple PNS-HPMC et PC-gomme de welan (figure 2.33). Par contre, des signes de compatibilité ont marqué les deux couples PNS-gomme de welan et PC-HPMC avec une augmentation accrue de la stabilité correspondant à une légère diminution de l'étalement.

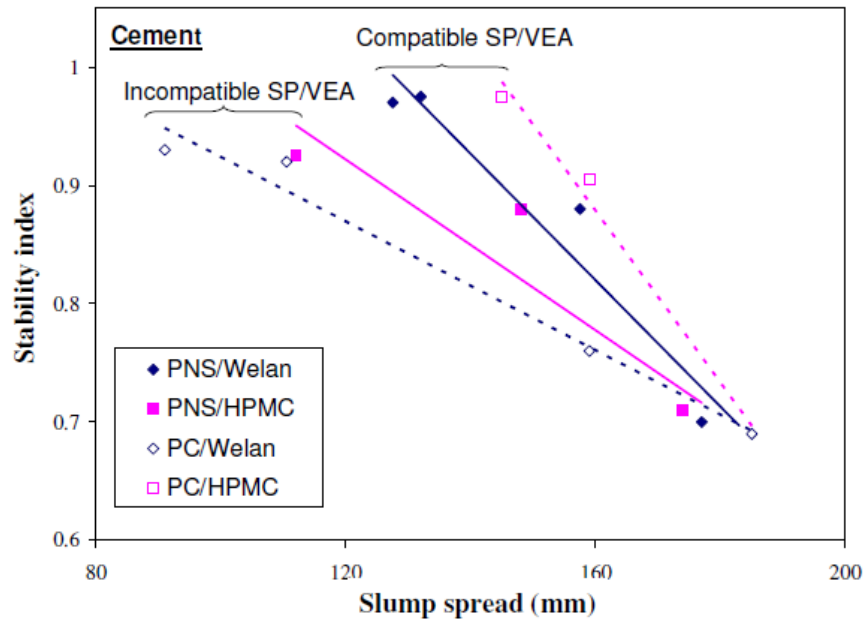


Figure 2.35 Stabilité des coulis de ciment en fonction de leur fluidité ($E/C = 0,65$, dosage constant en SP), tiré de [Khayat et coll., 2012] source de [Mikanovic et coll., 2009]

2.8 AUTRES PARAMÈTRES INFLUENÇANT LA RHÉOLOGIE

2.8.1 Effet du malaxage

Banfill et coll. [1991] ont montré que l'augmentation de la vitesse de malaxage d'un mortier dans un rhéomètre accélère l'hydratation du ciment. Le taux d'accroissement du moment de cisaillement augmente, donc la valeur de la contrainte de cisaillement augmente ainsi que la viscosité des mortiers. En effet, l'hydratation entraîne, par la formation de semi-hydrates et de chaux, une augmentation de la teneur en solides, donc une surface spécifique accrue d'où découle un regain d'attraction par des forces de Van der Waals ou par liaison hydrogène

(figure 2.34). De plus, l'énergie apportée par le malaxage élève sensiblement la température du mélange, ce qui a pour effet de diminuer le seuil de rigidité et augmenter μ_{pl} .

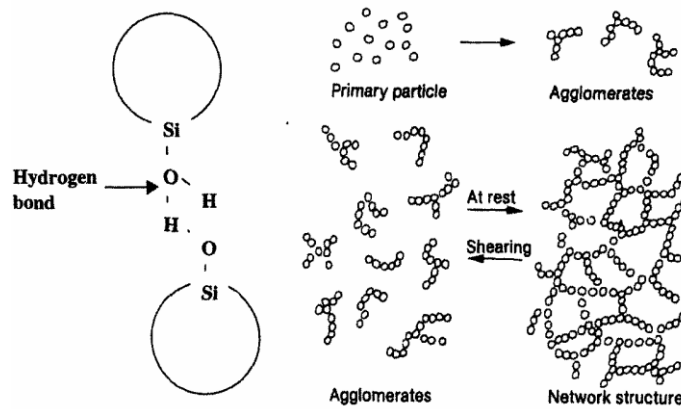


Figure 2.36 Effet déstructurant du malaxage et recomposition structurelle au repos [Khayat, 2002]

2.8.2 Effet du temps

Avec le temps, du fait de l'avancement de la réaction d'hydratation, la quantité d'hydrates augmente. Un effet similaire à celui décrit précédemment est obtenu.

Dans le cas des bétons fabriqués avec des ciments sans ajouts, il a été observé un accroissement de τ avec le temps sur la première heure, μ_{pl} ne semble que peu affectée sur ce court laps de temps. Quoiqu'il en soit, l'avancement de la réaction d'hydratation engendre un accroissement de la formation d'ettringite [Zhang et coll. 2002], et donc une rigidification de la suspension par accroissement de la concentration en solides. De plus, l'enchevêtrement des hydrates formés et la forme très irrégulière de la couche superficielle hydratée des grains de ciment accroissent ce phénomène. Il en résulte une élévation des valeurs de τ et de μ_{pl} avec l'avancement de la réaction.

2.9 SYNTHÈSE

À partir des années 90, l'intérêt d'étudier les propriétés rhéologiques des systèmes cimentaires fluides prend tout son élan. Très nombreuses sont les recherches qui ont été mené sur l'effet des AM. Il est constaté que la majorité des ces études se sont concentrés soit sur les propriétés

purement physiques des AM ou sur les propriétés purement chimiques. Dans les propriétés physiques, il s'agit souvent d'étudier le même matériau présentant différentes propriétés physiques (finesse, granulométrie). Des exceptions s'appliquent lorsque le but est de mettre la lumière sur la morphologie où le choix de différents AM s'impose. Par ailleurs, lorsque les propriétés chimiques sont évoquées, il s'agit plus d'étudier leurs interactions avec les adjuvants chimiques à travers des tests de point de saturations en SP ou des tests d'adsorption de SP accompagnée de mesure de conductivité électrique et de suivie de l'hydratation. Par conséquent, une tentative de mettre la lumière sur l'effet simultané des propriétés physiques et chimiques s'impose.

Par ailleurs, Étudier l'effet des AM en présence des adjuvants chimiques comme le SP présente un défi important en présence d'un rapport E/P élevé. Ceci entraîne toujours les chercheurs à diminuer le rapport E/P lorsqu'il s'agit de faire une telle étude. En effet, dans la plus part des études consultées, le rapport E/P ne dépasse pas 0,42. De plus, très peu d'études évoquent la contribution des AM en présence du couple SP-AV.

De plus, ce qui a été notée dans la littérature c'est que plusieurs travaux ont été effectué soit à l'échelle des coulis ou des mortiers sans avoir la certitude que les effets soulignés sont prédictives à l'échelle du béton. Aïtcin [2006] affirme qu'une combinaison ciment – SP peut fonctionner très bien à l'échelle des coulis mais que les performances ne sont pas aux attentes sur béton. De plus, il peut y arriver qu'une combinaison ciment – SP s'avère encore meilleure sur béton que ce qui était prévu par les résultats sur coulis.

Des chercheurs ont tenté d'établir une approche entre le mortier et le béton qui a pour objectif de rendre les résultats à l'échelle des mortiers bien prédictifs de ceux du béton. Cette approche c'est le mortier de béton équivalent [Erdem et coll., 2009]. Une nécessité s'impose pour tester les limites de cette méthode.

CHAPITRE 3 : OBJECTIFS, PROGRAMME EXPÉRIMENTAL ET PROCÉDURE D'ESSAIS

3.1 INTRODUCTION

L'utilisation des bétons fluides à rhéologie adaptée, tel que le béton autoplaçant (BAP) ne cesse d'augmenter grâce à leurs multiples avantages tels que flexibilité dans les formes complexes, utilisation des ferraillasses denses, court délai de construction. Cependant, le manque de connaissance du comportement à l'état frais de ce genre de béton a fait apparaître plusieurs problèmes comme le blocage lors de l'écoulement, pressions sur les parois des coffrages, ségrégation, etc.

Ce travail de recherche s'inscrit dans le cadre de la chaire de recherche industrielle sur les bétons à haute performance fluides à rhéologie adaptée (BHPFRA). La conception de cette nouvelle génération de bétons à haute performance nécessite, entre autres, des connaissances particulières des paramètres rhéologiques qui affectent considérablement la mise en place, la résistance à la ségrégation, la pompabilité, la pression sur les coffrages ainsi que la performance du béton à l'état durci.

Afin d'assurer une bonne maniabilité, les BHPFRA nécessitent un volume important en pâte. L'utilisation des ajouts minéraux (AM) et des adjuvants chimiques est indispensable dans la conception de ces bétons. L'utilisation des AM ou des fillers en présence des adjuvants chimiques présente un véritable défi pour assurer la compatibilité entre ces ingrédients. Comme il a été déjà mentionné dans la synthèse bibliographique, de nombreuses recherches ont été menées sur l'effet des AM sur les propriétés à l'état frais et durci des matériaux à matrice cimentaire. Néanmoins, des connaissances limitées existent sur les bénéfices potentiels de ces matériaux dans les milieux très fluides avec SP et AV et dans des systèmes ayant des rapports eau/poudre (E/P) relativement élevés. Les expressions " ciments binaires " et "ciment ternaires" sont utilisées dans ce manuscrit pour faire référence aux mélanges binaires ou ternaires contenant le ciment GU avec un ou deux AM en remplacement massique.

3.2 OBJECTIFS DE LA RECHERCHE

Des résultats antérieurs ont montré que des essais à l'échelle réduit sur des mortiers de bétons équivalents (MBE) peuvent être utilisés pour évaluer l'effet de la composition du mélange sur les propriétés rhéologiques des bétons fluides [Erdem et coll., 2009]. De ce fait, cette étude est menée principalement sur des MBE. Deux consistances sont visées par cette étude à savoir les BAP pour la construction des bâtiments et les bétons semi-fluides (BSF) pour la construction des infrastructures de transport.

L'objectif principal de cette recherche est d'évaluer l'effet des propriétés physiques et chimiques des ajouts minéraux en présence d'adjuvants chimiques, notamment les superplastifiants (SP) et les agents de viscosité (AV), sur les propriétés rhéologiques, la stabilité, la cinétique d'hydratation et la résistance à la compression des MBE. Comme l'utilisation d'un ajout minéral ou filler peut entraîner des déficiences à l'état frais ou durci, cette étude vise également à mettre en évidence les bénéfices des couples AM ainsi que leurs interactions en présence des adjuvants chimiques (SP et AV).

Les résultats sur MBE sont exploités et validés à l'échelle du béton afin d'évaluer la pertinence de la méthode du MBE dans la conception des BHPFRA ainsi de développer quelques bétons pour les applications visées.

3.3 MÉTHODOLOGIE

Pour atteindre les objectifs visés par cette recherche, un programme expérimental élargi comportant cinq phases principales a été mis au point. Ces phases sont les suivantes :

- 1. Caractérisation des matériaux utilisés :** Il s'agit de la caractérisation de tous les matériaux utilisés dans le cadre de cette étude, incluant les propriétés physico-chimiques des poudres (ciment, AM), les propriétés des granulats (sable, pierre 2,5-10 mm et pierre 5-14 mm) ainsi que les propriétés des adjuvants chimiques (SP, AV, et AEA).
- 2. Formulation des bétons de référence :** Cette phase constitue une étape importante dans cette étude, puisqu'il s'agit de formuler les bétons références à partir desquels l'étude est menée. Il s'agit aussi de déterminer les adjuvants qui entrent dans la composition des

bétons de référence (SP, AV et AEA). Deux combinaisons SP-AV sont sélectionnées pour la formulation des BAP destinés à la construction de bâtiments. Les mêmes deux SP sont utilisés, avec leurs agents entraîneurs d'air compatibles, dans la formulation des bétons semi-fluides (BSF) pour la construction des infrastructures. Pour ces derniers bétons, les résultats ont montré que l'utilisation d'un AV n'est pas nécessaire. Par la suite, les MBE références sont formulés en faisant extraire la phase du mortier à partir des bétons références correspondants. Le principe de la méthode MBE est décrit dans le § 3.3.2.1.

- 3. Étude de l'effet des ciments binaires sur les propriétés des MBE :** Il s'agit d'étudier l'effet du remplacement massique du ciment par six différents AM et deux fillers calcaire (tableau 3.1), introduits à tour de rôle, sur les propriétés rhéologiques, la stabilité, la cinétique d'hydratation et les résistances à la compression des MBE correspondant aux BAP et aux BSF. Les MBE correspondants aux BAP sont notés MBE-AP (mortiers des bétons équivalents autoplaçants) et les MBE correspondant aux BSF sont noté MBE-SF (mortiers des bétons équivalents semi-fluides). Les six AM et les deux fillers calcaires avec leurs nomenclatures sont définis dans le tableau 3.1. Plus de détails sur les différents taux de remplacement utilisés dans cette phase sont présentés sur la figure 3.1. Par la suite, dépendamment de la combinaison SP-AV, des liaisons sont établies entre les différentes propriétés physiques des AM (finesse, granulométrie, morphologie et compacité humide) et les propriétés rhéologiques (seuil de cisaillement et viscosité plastique) des MBE étudiés.
- 4. Étude de l'effet des ciments ternaires sur les propriétés des MBE :** À travers les résultats de la phase 3, les AM sont classés en deux groupes. Les AM à faible réactivité, comme la CV-F, CV-C, CC3, CC35, L100 et le L120 et les AM à réactivité élevée comme la FS et le MK. L'interaction qui peut résulter lors de l'utilisation de deux AM sur la demande en SP, le comportement rhéologique, la cinétique d'hydratation et le développement des résistances à la compression des MBE est étudiée moyennant la méthode des plans d'expériences. Pour les MBE-AP, un plan factoriel de deux facteurs à trois niveaux est utilisé pour les deux types de SP-AV. Tandis que pour les MBE-SF, un plan composite centré à deux facteurs est utilisé pour les deux types de SP. Pour chaque

type de MBE, plusieurs combinaisons sont expérimentées afin d'établir des modèles permettant d'expliquer le rôle de chaque AM. Plus de détails se trouvent dans la figure 3.1.

5. Optimisation multiparamétrique et validation à l'échelle du béton : Afin de développer des bétons fluides écologiques présentant les meilleurs rapports qualité-prix, des systèmes ternaires sélectionnés sont validés sur les mélanges de bétons correspondants aux deux types de MBE étudiés. La sélection des systèmes ternaires est basée sur une optimisation multiparamétrique. Pour chaque critère tel que la demande en SP, les propriétés rhéologiques, les résistances à la compression à 1 et 28 jours ainsi que le coût, des objectifs sont fixés tout en attribuant un degré d'importance à chacun (qui varie de 1 à 5). Par la suite, plusieurs essais sont effectués à l'échelle du béton, à l'état frais et durci, afin d'évaluer la performance des systèmes sélectionnés dépendamment de l'application visée (figure 3.1). Finalement, des relations sont établies entre les résultats obtenus à l'échelle des MBE avec ceux des bétons, afin d'estimer la pertinence de la méthode MBE, vis-à-vis la prédiction des propriétés rhéologiques, la demande en SP et le développement des résistances.

Tableau 3. 1 Identification des poudres

Poudre	Nomenclature	Type
Ciment	Ciment	GU
Cendre volante	CV-F	Classe F
	CV-C	Classe C
Laitier	L120	Finesse élevée
	L100	Finesse modérée
Fillers calcaires	CC3	Finesse élevée ($D_{50} \approx 3 \mu\text{m}$)
	CC35	Finesse modérée ($D_{50} \approx 35 \mu\text{m}$)
Fumée de silice	FS	-
Métakaolin	MK	-

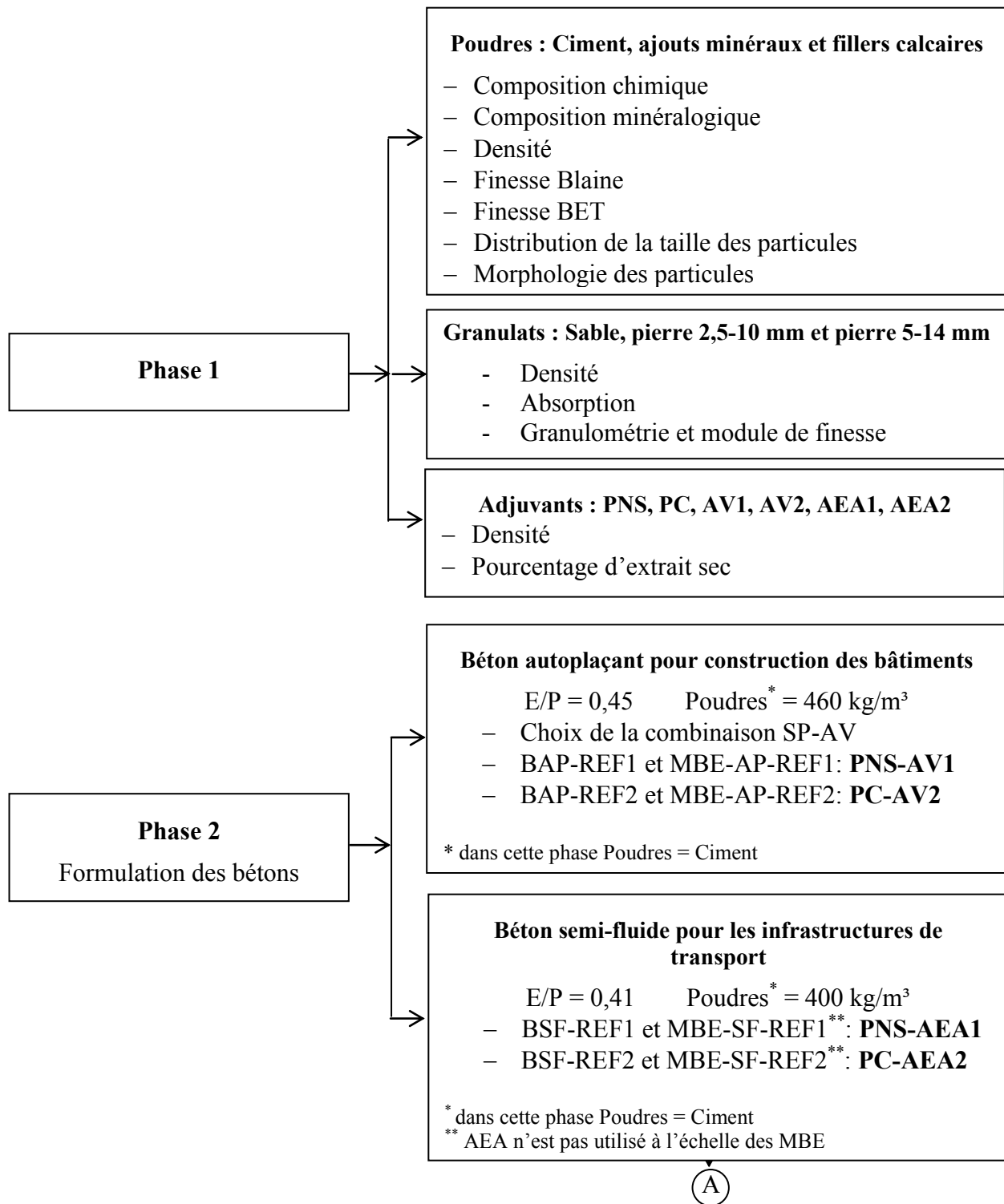


Figure 3.1 Illustration du plan expérimental

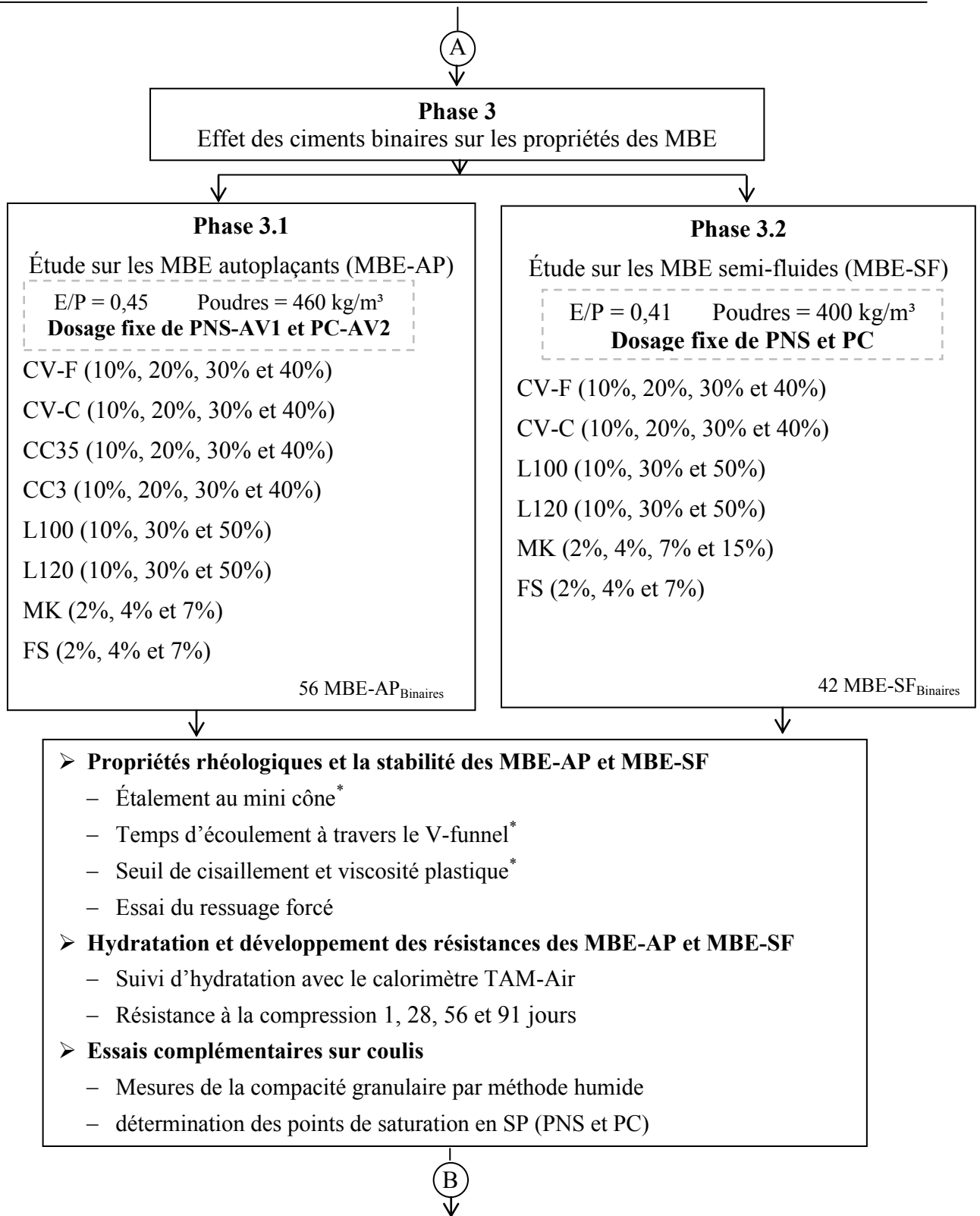
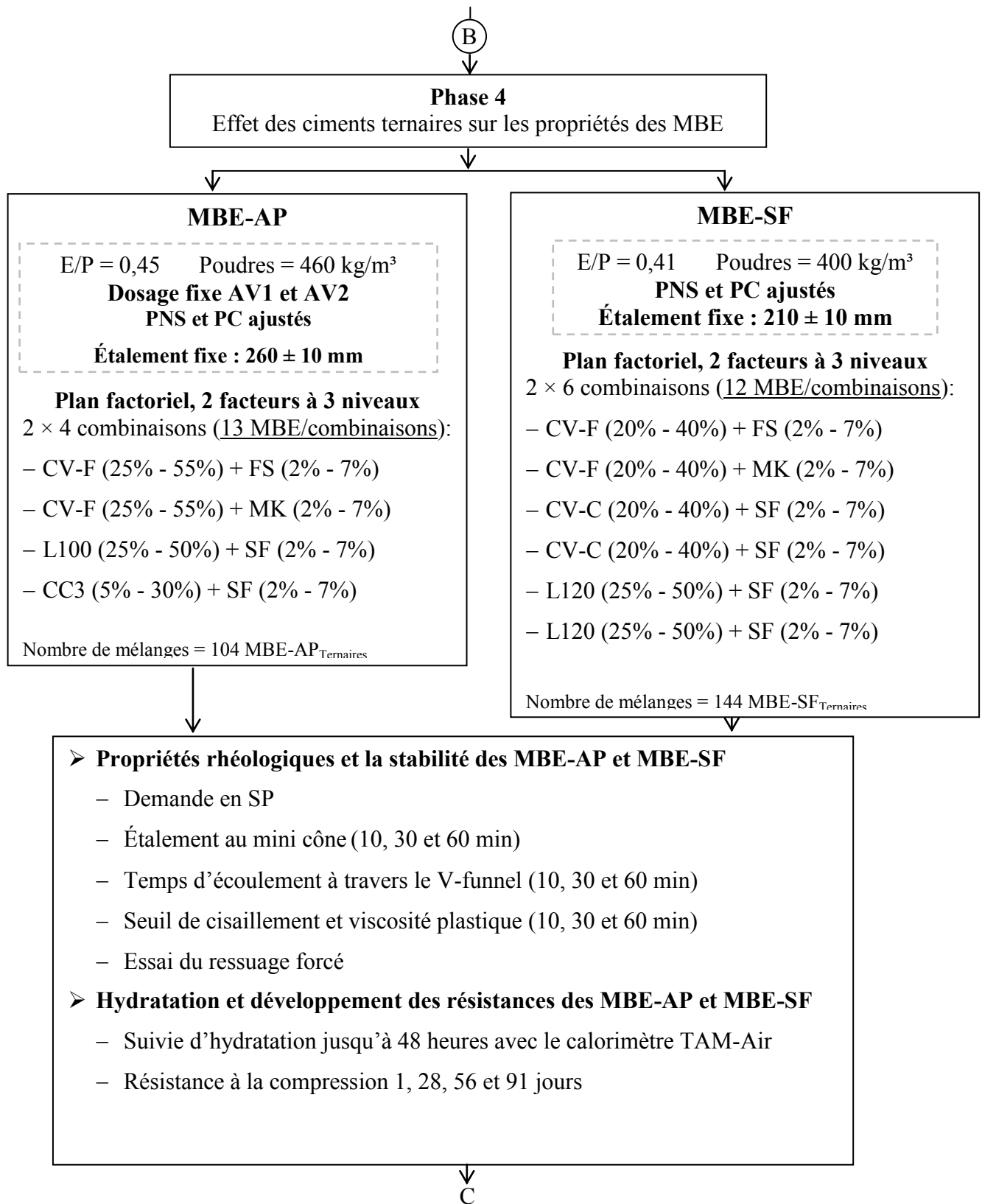


Figure 3.1 Illustration du plan expérimental (suite)



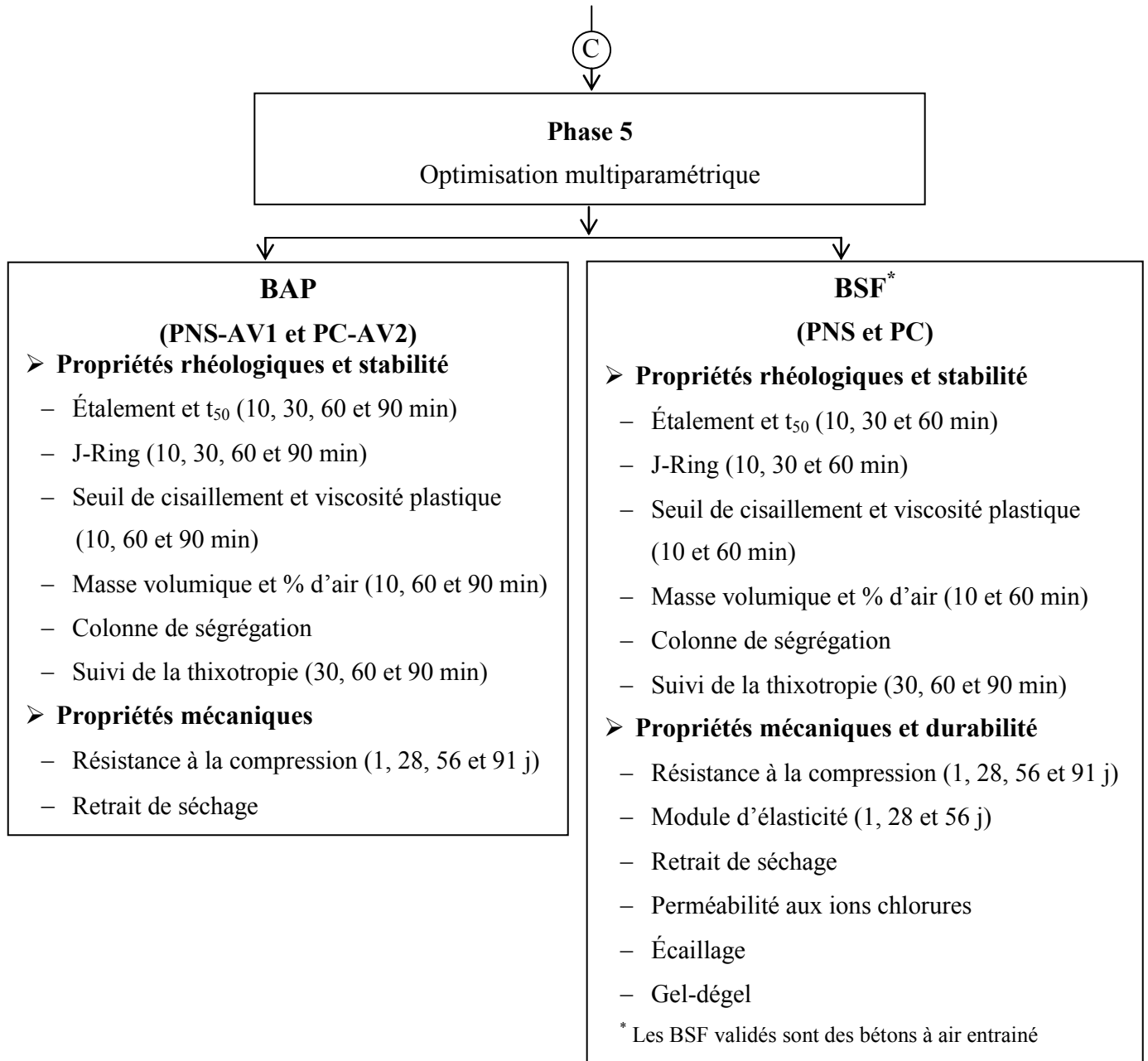


Figure 3.1 Illustration du plan expérimental (suite)

3.4 ESSAIS DE CARACTÉRISATION

La figure 3.2 résume les procédures expérimentales utilisées dans la caractérisation des poudres, des mortiers (à l'état frais et durci) et des bétons (à l'état frais et durci).

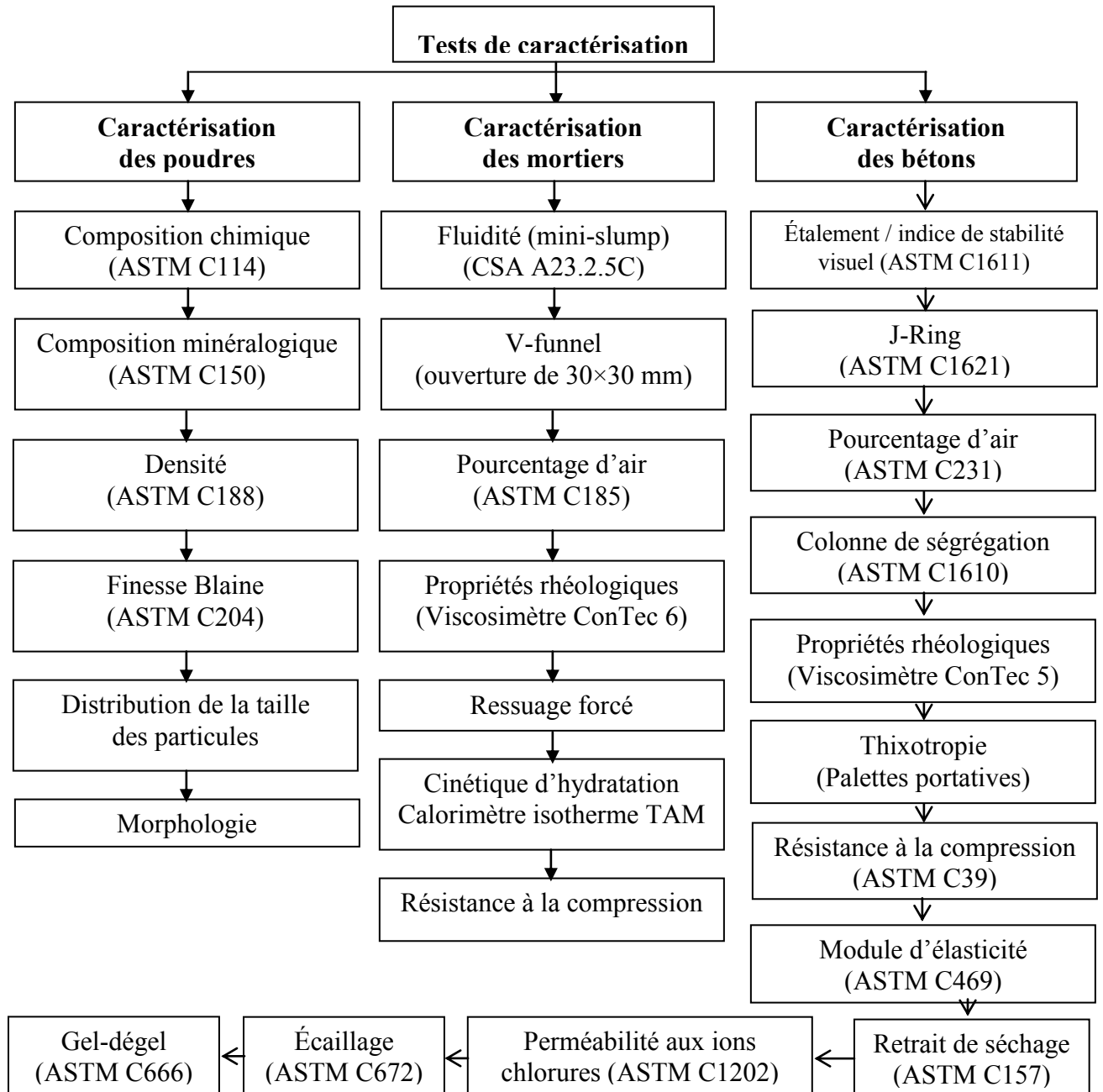


Figure 3.2 Récapitulatif des tests de caractérisation

3.4.1 Essais de caractérisation des poudres

3.4.1.1 Fluorescence X

Les pourcentages des principaux oxydes présents dans le ciment portland, les AM et les fillers sont déterminés par l'analyse chimique en fluorescence X (FRX). Les essais ont été effectués au centre de caractérisation des matériaux de l'Université de Sherbrooke.

3.4.1.2 Diffraction des rayons X

L'analyse par diffraction des rayons X a permis de déterminer les phases cristallines et de caractériser les solides non-cristallins ou amorphes. Chaque espèce cristalline donne un spectre de diffraction, qui est un ensemble de raies de diffraction dont la position et l'intensité en sont la signature.

Dans le cadre de cette étude, un diffractomètre de marque X'pert Pro MRD de la compagnie PANalytical est utilisé, il est doté d'un goniomètre θ - θ en géométrie Bragg Brentano par réflexion. Le matériau à analyser est placé dans le porte-échantillon, l'échantillon est fixe mais le détecteur et la source sont en mouvement. La collimation du faisceau incident est en mode fixe. Le diffractomètre est équipé d'un détecteur spatial X'celerator qui permet de couvrir une gamme d'environ 2 degrés avec une résolution de $0,018^\circ$ en 2θ .

Sur les spectres du ciment, les pics de C_3S et de C_2S sont les plus intenses. Les pics des autres phases sont moins intenses et peuvent être masqués par ceux des deux silicates. Afin de faciliter la détection des phases mineures, le ciment est traité dans une solution d'acide salicylique pour y dissoudre les silicates de façon à pouvoir analyser l'échantillon résultant en DRX. Ce traitement est couramment appelé « traitement SAL ». Ainsi, les autres phases (C_3A et C_4AF) et les sulfates, qui influencent grandement le comportement rhéologique des ciments, sont mieux détectés.

3.4.1.3 Microscope électronique à balayage

La morphologie du ciment et des AM est examinée par le microscope électronique à balayage (MEB). Le MEB utilisé est à pression variable d'Hitachi, modèle S-3400N, fonctionnant avec une tension de 3kV. Un faisceau électronique extrêmement mince (100 à 200 Angströms, soit

1 à 2/100000e mm de diamètre) balaye ligne par ligne la surface d'un échantillon soumis au vide. Sous son impact, l'échantillon émet des électrons secondaires qui sont captés par un scintillateur, amplifiés par un tube photomultiplicateur et restitués en lignes de points plus ou moins lumineux sur un écran vidéo. L'image créée n'est pas une image directe mais elle est virtuelle reconstituée à partir d'électrons. Les éléments en relief de l'objet émettent plus d'électrons secondaires et apparaissent en clair sur l'image. Ces contrastes donnent une bonne impression du relief. La capacité d'agrandissement peut atteindre 300 000 fois. Un agrandissement allant à 3 000 fois est utilisé dans cette étude. Dans le cas de la FS, un agrandissement allant à 15 000 fois n'a pas donné une bonne résolution de l'image. De plus, pour les CV-F et la CV-C, il y a eu besoin de connaître la taille moyenne des particules à cause d'une distribution granulométrique bimodale. Ceci a conduit à utiliser un autre MEB pour ces trois AM, qui est le MEB à haute résolution S-4700. Ce dernier permet d'avoir des images de très haute résolution avec un agrandissement allant jusqu'à 500 000 fois. Un agrandissement allant à 30 000 fois a été utilisé pour la FS sans nuire à la résolution de l'image.

3.4.1.4 Granulométrie laser

La distribution granulométrique des poudres dispersées dans une solution a été analysée par le granulomètre laser Mastersizer 2000, de la compagnie Malvern. La distribution de la taille des particules est déduite de l'interaction entre un rayonnement incident et un ensemble de particules. Le principe est appliqué pour des particules de 20 nm à 2 mm de diamètre qui sont préalablement dispersées dans un milieu liquide et au moyen d'ultrasons adaptés à la poudre analysée.

3.4.1.5 Finesse Blaine

La finesse Blaine des poudres est déterminée par perméabilité à l'air, conformément à la norme ASTM C204. Le test consiste à mesurer le temps de passage d'une quantité d'air donnée à travers un certain volume de poudre compacté dans une cellule. Ce temps de passage est comparé avec le temps de passage à travers un échantillon de ciment étalon qui a une surface spécifique connue. En connaissant la densité et la porosité de l'échantillon et du ciment étalon, la surface spécifique peut être calculée.

3.4.2 Caractérisation des MBE

Tous les MBE sont caractérisés à l'état frais et à l'état durci selon les normes en vigueur (figure 3.2). La fluidité et la capacité de passage des mélanges sont déterminées par le mini-cône, l'entonnoir en V et le viscosimètre ConTec 6 à 10, 30 et 60 minutes. Pour éliminer l'effet de l'air sur les mesures rhéologiques, un agent dés-entraîneur d'air est utilisé dans tous les mélanges de MBE. La teneur en air des MBE est vérifiée selon la norme ASTM C185. La stabilité de tous les MBE est évaluée par l'essai du ressuage forcé. La colonne de conductivité est utilisée pour vérifier la stabilité de certains mélanges avant leur validation sur béton. L'hydratation des MBE est suivie pendant les premières 48 heures moyennant le calorimètre isotherme TAM air. La caractérisation des MBE se termine par la détermination des résistances à la compression à différents âges. Une description détaillée de la formulation et la fabrication des MBE ainsi que les essais de caractérisation est présentée ci-dessous.

3.4.2.1 Méthode du mortier de béton équivalent (MBE)

Le but de travailler sur des mortiers est d'alléger les essais souvent fastidieux sur béton et ainsi de diminuer les coûts afférents. Comme la composition des mortiers ordinaires est très riche en ciment par rapport aux bétons classiques, ceci conduit à des comportements non reproductibles sur le béton. Erdem et coll. [2009] ont montré que la méthode du mortier de béton équivalent (MBE) est un bon outil pour la prédiction de l'effet de la composition du mélange sur les propriétés rhéologiques des bétons fluides. Le principe de cette méthode est de formuler le mortier à partir de la composition du béton correspondant en remplaçant la surface spécifique des gros granulats par une surface spécifique équivalente de sable (figure 3.3). Il est considéré que tous les granulats (fins et grossiers) sont sphériques. La formulation du MBE est résumée de la manière suivante :

- Même nature et dosage en ciment et en AM que dans le béton de référence ;
- Même rapport E/P que dans le béton de référence ;
- Même nature et dosage en adjuvants par rapport au ciment, avec le même mode d'introduction que dans le béton ;

- Le dosage du sable est égal à la quantité du sable dans le béton plus la quantité du sable reproduisant la même surface granulaire que les gros granulats retirés. Les granulats sont tous assimilés sphériques et la courbe granulométrique est discrétisée en 10 séries de particules monodimensionnelles dont le diamètre est égal à la moyenne arithmétique des mailles des deux tamis adjacents.

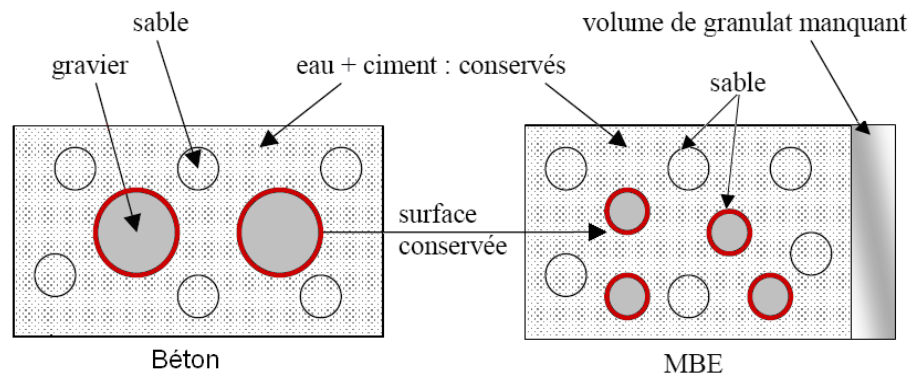


Figure 3.3 Passage du béton au MBE

3.4.2.2 La séquence de malaxage des MBE

Tous les mélanges de mortier sont confectionnés dans un malaxeur type gros HOBART, de capacité de 10 L (figure 3.4-a). La séquence de malaxage pour le mortier consiste à :

1. Homogénéiser le sable dans le malaxeur pendant 30 sec ;
2. Corriger la quantité du sable et de l'eau en calculant l'humidité du sable ;
3. Incorporer le $\frac{3}{4}$ de la quantité d'eau avec le sable et malaxer pendant 1 min ;
4. Ajouter les poudres et malaxer 30 sec ;
5. Ajouter le reste de la quantité d'eau mélangée avec le superplastifiant et malaxer pendant 1 min ;
6. Ajouter l'agent de viscosité et continuer le malaxage pendant 3 min ;
7. Prendre un repos de 2 min ;
8. Re-malaxer pendant 2 min.

La température de l'eau de malaxage est ajustée de sorte à limiter la température du mortier à moins de 22 °C afin de prévenir l'échauffement excessif du mortier.

Les différents essais sont effectués à 10, 30 et 60 min du temps de contact eau-ciment. Entre ces intervalles de temps, le mortier est remis dans le malaxeur et couvert avec serviette humide et un film en plastique par-dessus. De plus, chaque 10 min le mortier est re-malaxer pendant 1 min afin de prévenir la sédimentation du mortier et simuler le transport en camion.

3.4.2.3 Essai du mini cône

L'essai du mini cône pour mortier est un essai qui s'apparente à celui de l'affaissement/l'étalement dans le béton. Les dimensions du mini cône sont illustrées sur la figure 3.4-b. Le test consiste à verser le mortier dans le mini-cône, placé au préalable sur une plaque de plexiglass bien à niveau puis soulever d'un coup le cône. Une fois le mortier bien étalé, la valeur de l'étalement correspond au diamètre moyen de la galette du mortier.

Le diamètre de l'étalement est utilisé pour définir la fluidité des MBE et vérifier ainsi la relation entre l'étalement du MBE et celui du béton correspondant. De plus, cet essai permet de détecter visuellement la tendance à la ségrégation et au ressuage du mélange. En effet, pour un mélange stable, le sable doit être uniformément réparti sans concentration ou séparation des fines sur les bords de la galette.

3.4.2.4 Entonnoir en V (V-funnel)

Cet essai consiste à mesurer le temps d'écoulement du mortier, à travers un entonnoir en V, entre l'instant de l'ouverture de l'orifice de l'entonnoir et l'instant de l'apparition de la première lumière en regardant verticalement vers le bas de l'entonnoir. Les dimensions de l'entonnoir sont définies sur la figure 3.4-c.

3.4.2.5 Teneur en air

La teneur en air des MBE est calculée à partir de la masse volumique mesurée et la masse volumique théorique du MBE. La masse volumique des MBE est mesurée selon la norme ASTM C185. Cette mesure consiste à placer un échantillon de mortier dans un contenant de volume de 400 ± 1 ml. Vue la fluidité des MBE étudiés, le mortier est placé en une seule couche, quelques coups par l'extérieur peuvent s'avérer nécessaires si l'étalement du MBE est inférieur à 160 mm. La surface supérieure du mortier est ensuite arasée en prenant le soin de

bien nettoyer les parois du contenant, puis l'ensemble est pesé. La masse volumique du mortier est obtenue en divisant la masse du mortier par le volume du contenant.

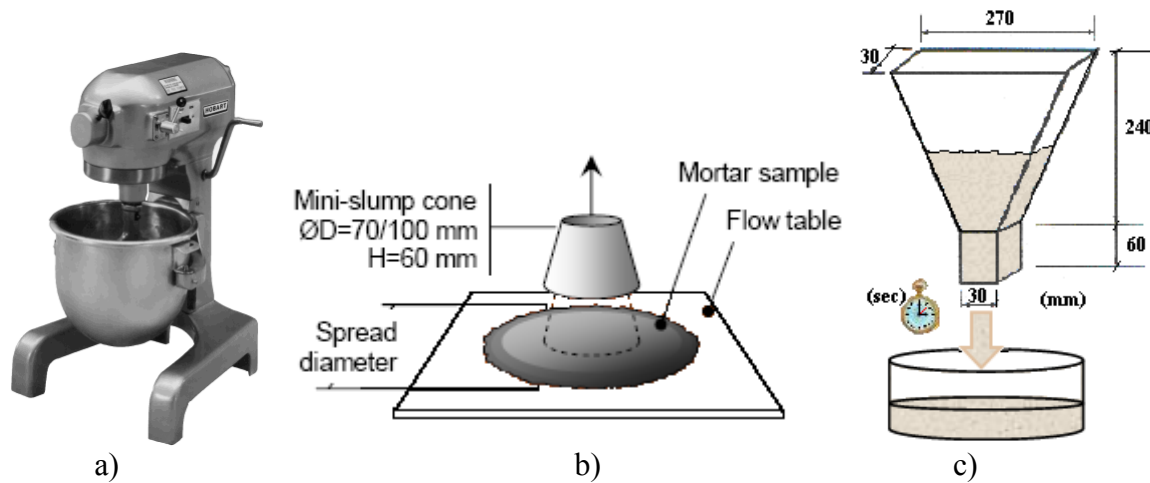


Figure 3.4 a) Malaxeur gros HOBART utilisé pour le malaxage des MBE, b) Essai d'étalement pour mortier, c) Essai d'écoulement à travers V-funnel pour mortier

3.4.2.6 Viscosimètre ConTec 6

Le viscosimètre ConTec 6 est utilisé pour mesurer les propriétés rhéologiques des différents MBE (figure 3.5-a). C'est un viscosimètre à cylindres coaxiaux, qui permet de mesurer le seuil de cisaillement et la viscosité plastique des coulis et des mortiers dont le diamètre maximal des particules est inférieur à 5 mm [ConTec BML, 2006]. L'appareil possède un cylindre intérieur fixe connecté à une cellule qui mesure le torque et un cylindre extérieur rotatif. Les dimensions des cylindres sont présentées dans la figure 3.5-b. Le viscosimètre est contrôlé par un logiciel appelé FreshWin. Les paramètres appropriés tel que la géométrie du cylindre et le protocole de mesure sont introduites à partir du logiciel. Les mesures sont effectuées sur une courbe de paliers descendants des gradients de vitesse. Sept paliers de vitesses allant de 0,5 à 0,09 tours par seconde sont utilisés pour les MBE-AP et 10 paliers de vitesses allant de 0,5 à 0,025 tours par seconde pour les MBE-SF. Plus de détails sur les paramètres du protocole suivi pour les deux types de MBE sont présentés dans le Tableau 3.2. Les résultats sont obtenus après une interpolation linéaire correspondant à un comportement d'écoulement de Bingham et des calculs basés sur l'équation Reiner-Rivlin.

Un indice de ségrégation est obtenu grâce à un palier supplémentaire où la vitesse est augmentée au 2/3 de la vitesse maximale, c'est-à-dire 0,33 tours/sec. La différence de la pente de ce point avec celle de la viscosité plastique définit l'évolution de la ségrégation de l'échantillon durant le test. Un coefficient de ségrégation inférieur à 5% signifie qu'aucune ségrégation significative n'a eu lieu durant le test et que le mélange est jugé stable. Tandis que, si ce coefficient est supérieur à 10%, cela dit qu'une ségrégation significative est notée et que le mélange testé est instable [ConTec BML, 2006]. Tous les MBE sont fabriqués à partir d'un sable préalablement passé par un tamis de 4,75 mm afin de s'assurer que le diamètre maximal ne dépasse pas 5 mm. De plus, il est à noter que pour tous les MBE, la fraction du sable entre 2,5 à 4,75 mm n'a pas dépassé 12% du refus cumulé.

Les propriétés rhéologiques sont mesurées à 10, 30 et 60 min. Entre les mesures, le mortier est retourné dans le grand Hobart et re-malaxé pendant 1 min chaque 10 min, et les cylindres du viscosimètre sont soigneusement lavés, séchés et mis en place pour une prochaine mesure.

Tableau 3.2 Protocole de mesure suivi pour les MBE-AP et les MBE-SF

Type de MBE	Vitesse rotation minimale (tour/sec)	Vitesse de rotation maximale (tour/sec)	Nombre de paliers	Temps de mesure/palier (sec)	Nombre de points
MBE-AP	0.09	0.5	7	3	50
MBE-SF	0.025	0.5	10	4	50

3.4.2.7 Ressuage forcé

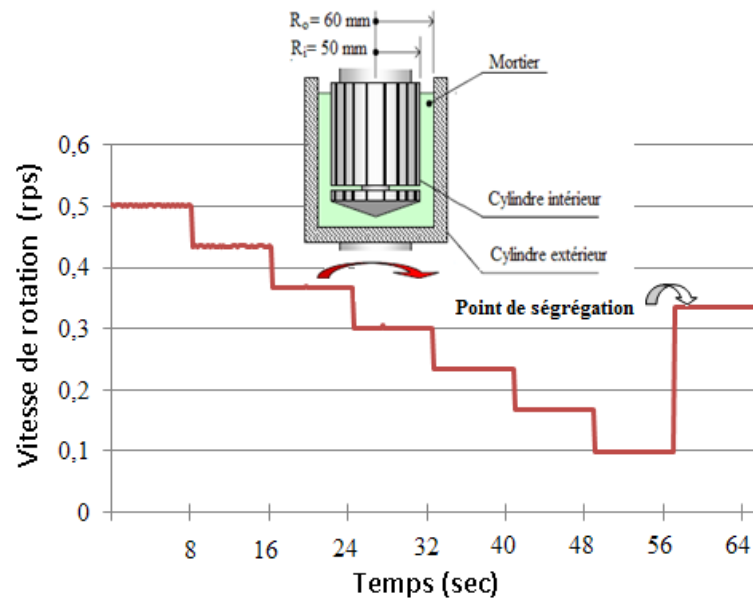
La stabilité des MBE est liée par le degré de rétention de l'eau dans le mélange qui est déterminé par l'essai du ressuage forcé (figure 3.6). Cet essai consiste à filtrer 900 ml de mortier sous une pression de 690 kPa (100 PSI). Le filtre utilisé est en microfibre de verre N° A/E, qui se caractérise par une résistance à l'humidité et une forte capacité de rétention des solides. Le volume d'eau séparé du volume total du MBE est enregistré à des intervalles de temps donnés jusqu'à 10 min.

Le ressuage forcé est exprimé en pourcentage par rapport au volume total de l'eau théorique contenu dans la masse de l'échantillon initicoll. Pour les 28 MBE préparés, des mesures ont été enregistrées chaque 30 sec, pendant les trois premières minutes et puis chaque minute

jusqu'à 10 min. Un exemple de l'évolution du ressuage forcé en fonction du temps de quelque MBE est présenté sur la figure 3.7-a. Une relation linéaire est trouvée entre le ressuage forcé mesuré pendant les premières minutes (2,5 min) et celui mesuré à 10 min (figure 3.7-b). Par conséquent, il a été jugé plus simple de prendre en considération seulement les mesures à 10 min.



a)



b)

Figure 3.5 a) Viscosimètre ConTec 6 à cylindres coaxiaux pour mortiers,
b) Séquence utilisée pour les mesures sur mortiers



Figure 3.6 Dispositif du ressuage forcé

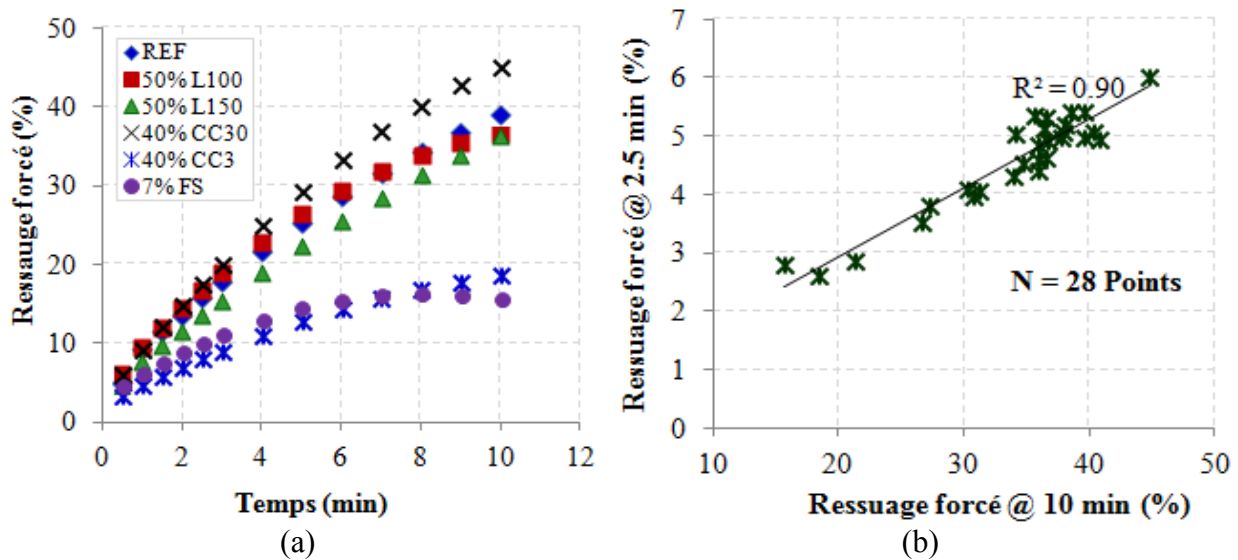


Figure 3.7 (a) Évolution du ressuaage forcé dans le temps d'essais pour quelques mélanges de MBE; (b) corrélation entre les pourcentages d'eau essorée à 2,5 min et à 10 min

3.4.2.8 Conductivité électrique

La conductivité électrique est utilisée pour évaluer la stabilité statique de certains MBE sélectionnés pour une validation à l'échelle de béton. La colonne de conductivité utilisée est illustrée à la figure 3.8, cette colonne comporte 10 paires d'électrodes, diamétralement opposés, réparties sur la hauteur du cylindre. Les électrodes sont en acier inoxydable, elles sont connectées à une source de tension et à un système d'acquisition de données [Otis, 2000].

Le test consiste en premier lieu à calibrer la colonne par une solution saline dont la conductivité est connue. Ensuite, le mortier est placé dans la colonne puis recouvert d'un film en plastique. L'acquisition des mesures se fait du haut vers le bas de la colonne toutes les 2,5 minutes. Dans les systèmes cimentaires, la conduction électrique se fait principalement par les ions libérés lors de la dissolution du ciment, ce qui représente la solution interstitielle. Ainsi, la proportion du liquide dans la cellule de mesure a une répercussion directe sur la mesure de la conductivité. De l'autre côté, la cristallisation des hydrates diminue la conductivité électrique. À la fin de l'expérience le volume d'eau de ressuaage est mesuré.

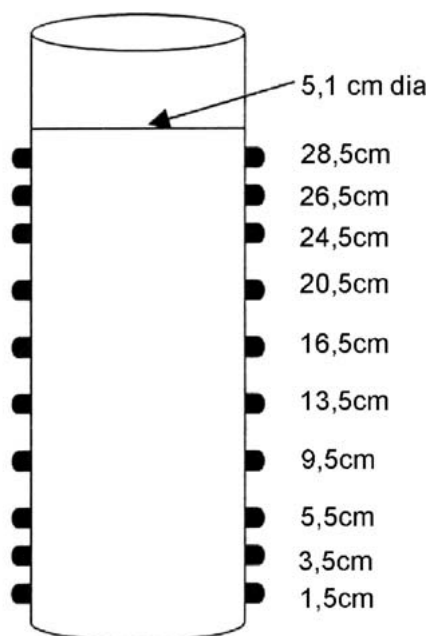


Figure 3.8 Colonne utilisée pour les mesures de conductivité électrique [Otis, 2000]

3.4.2.9 Calorimétrie

Un calorimètre isotherme est utilisé pour suivre la cinétique d'hydratation des différents MBE étudiés. La chaleur d'hydratation dégagée est mesurée pendant les premières 48 heures dans le calorimètre isotherme TAM Air (figure 3.9). Ce calorimètre possède un thermostat qui permet de travailler en conditions isothermes à des températures comprises entre 5 et 90 °C. Dans le cas de cette étude, les mesures sont réalisées à 21 °C qui correspond à la température du laboratoire.

Le calorimètre isotherme TAM Air comporte huit cellules de mesures isothermes connectées à un ordinateur où les données de une jusqu'à huit cellules peuvent être enregistrées en même temps. Chaque cellule est construite dans une configuration double avec un côté pour l'échantillon à étudier et l'autre côté pour le matériau de référence (figure 3.9-b).

Pendant les mesures, l'échantillon et le matériau de référence sont conservés dans des ampoules (de 20 ml de volume) bien fermées dont la température doit rester rigoureusement constante. Pour ce faire, le dégagement de chaleur provoqué par la réaction d'hydratation du mortier est pompé rapidement par des capteurs.

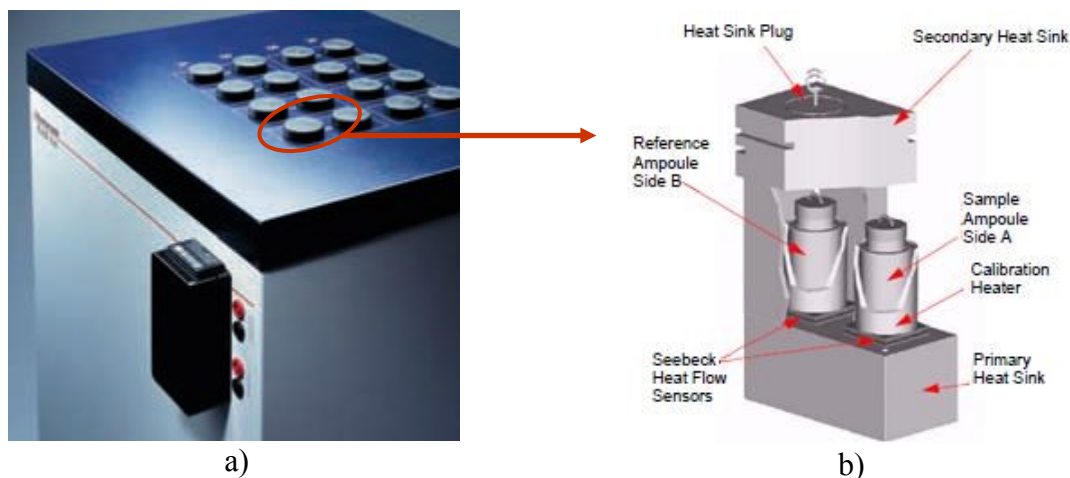


Figure 3.9 Calorimètre isotherme TAM Air a) vue général, b) vue en coupe montrant la double configuration d'une des huit cellules [TAM Air, 2011]

3.4.2.10 Répétabilité des essais de calorimétrie

Pour évaluer la précision des résultats calorimétriques, le même mélange de MBE est répété cinq fois et à chaque fois un échantillon de MBE est prélevé pour un test de calorimétrie. Une masse équivalente à 10 ml de ce MBE est échantillonnée et pesée, dans une ampoule, à partir du mélange préparé dans le grand Hobart. L'ampoule est ensuite fermée et placée dans le calorimètre. L'évolution du flux thermique est enregistrée pendant 48 heures. Comme les échantillons des mortiers sont préparés à l'extérieur du calorimètre les premières minutes ne sont pas prises en considération.

La figure 3.10 représente l'évolution du flux thermique en fonction du temps, d'un mélange de MBE répété cinq fois. Un important écart est constaté entre les cinq courbes. Cet écart dans la courbe calorimétrique est attribué à l'échantillonnage. En effet, le volume de MBE échantillonné est faible (10 ml) par rapport au volume total du MBE préparé (6 litres), ce qui donne la probabilité que l'échantillon prélevé peut ne pas être représentatif. Le mortier prélevé peut contenir plus de grains de sable et moins de pâte d'un échantillon à un autre. Le flux thermique de la figure 3.10 concerne un MBE-AP avec un système ternaire de poudre (51% ciment + 40%

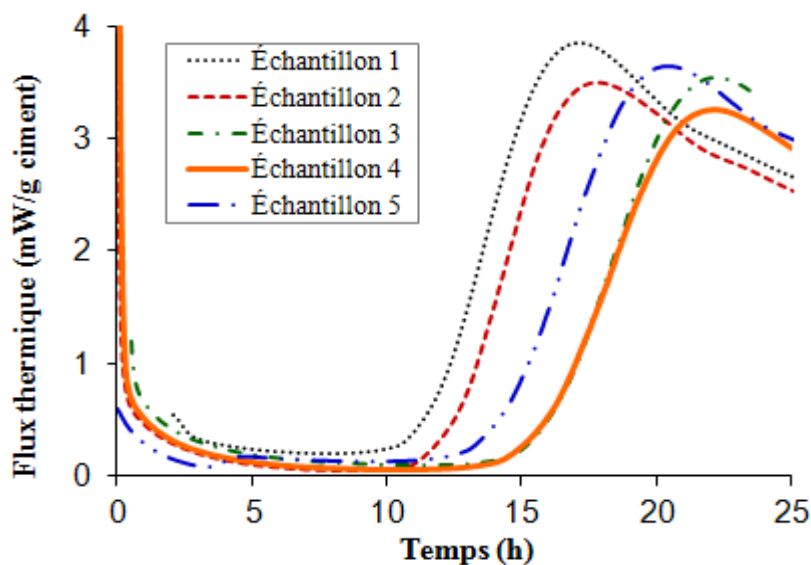


Figure 3.10 Répétabilité du flux thermique des MBE échantillonnés directement du grand Hobart

CV-F + 8,5% MK). Les échantillons 3 et 4 ont présenté une période dormante plus prolongée et un deuxième pic moins intense par rapport aux autres échantillons. Ceci est attribué au fait que ces échantillons peuvent contenir une petite masse de poudre moins homogénéisée et qui peut contenir plus de CV-F, ce qui peut faire toute une différence pour un volume aussi faible que 10 ml.

Afin de diminuer l'erreur lors des essais de calorimétrie, une deuxième méthode est utilisée pour la préparation des échantillons à tester. Il s'agit de préparer les échantillons dans les ampoules et de les mélanger manuellement avec une petite spatule, à l'extérieur du calorimètre.

La figure 3.11 représente les résultats du flux thermique du même MBE précédent, répété trois fois mais préparé directement dans les ampoules et mélangé manuellement. Une bonne répétabilité des courbes de flux thermique est observée. En termes des valeurs du pic thermique, les résultats sont à moins de 2.7% de variation de la valeur moyenne. Tandis que cette valeur est de 6.2% dans le premier cas (tableau 3.3). Ceci indique que l'utilisation de la deuxième méthode pour la préparation des échantillons semble plus adéquate pour cette étude.

Le temps de prise des différents MBE est estimé avec la méthode de la dérivée qui définit le temps de prise final comme le temps correspondant au premier maximum de la dérivée de la

courbe de dégagement de chaleur [Bentz, 2009]. Ce temps est utilisé juste à titre indicatif de l'effet des AM sur la prise des MBE.

Tableau 3.3 Erreur induite dans le pic d'hydratation en fonction de la méthode de préparation des échantillons

	Pic des mortiers échantillonnés du gros Hobart	Pic des mortiers préparés et mélangés manuellement
Nombre d'essais	5	3
Moyenne (mW/g)	3.55	3.57
Écart type (mW/g)	0.22	0.096
Coefficient de variation (%)	6.2	2.7

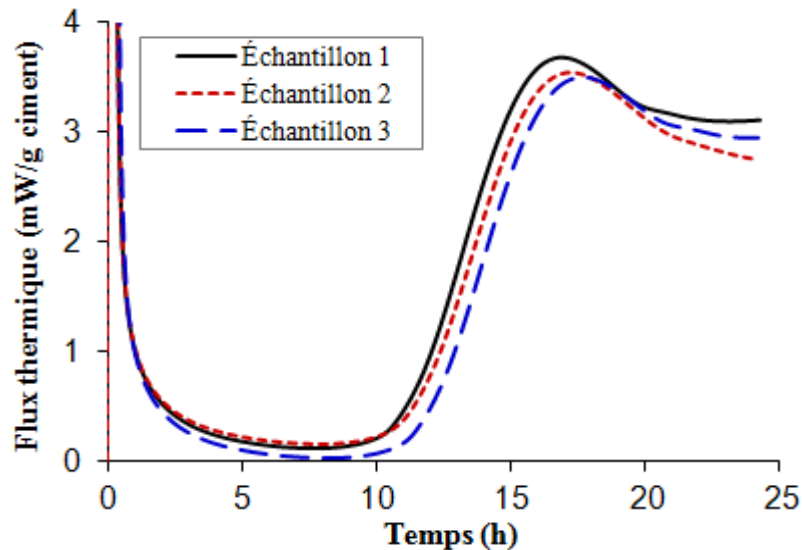


Figure 3.11 Répétabilité du flux thermique des MBE préparés et mélangés manuellement

3.4.2.11 Conservation des échantillons

Pour chaque MBE, un échantillonnage est effectué pour les essais de résistances à la compression. Des moules cubiques de 50 mm sont remplis pour des tests à 1, 28 et 91 jours. Les échantillons dans leurs moules sont couverts avec un film en plastique et laissés dans les conditions normales du laboratoire (température d'environ 20 °C et humidité relative d'environ 5 à 8%). Au bout de 24 heures, les échantillons sont démoulés et mis dans des contenants d'eau saturée en chaux, le tout conservé dans une salle de mûrissement à 23 °C et 100% d'humidité relative.

3.4.2.12 Résistance à la compression

La résistance à la compression est déterminée selon la norme ASTM C109 sur les cubes de 50 mm. La moyenne de trois cubes est prise pour chaque âge.

3.4.2.13 Répétabilité des essais de caractérisation

Afin d'évaluer l'erreur relative des essais de caractérisation des MBE, plusieurs mortiers ont été préparés couvrant les deux consistances visées dans cette étude : autoplaçant (AP) et semi-fluide (SF).

À travers les résultats obtenus des différents essais et présentés dans le tableau 3.4, il est constaté que l'étalement mesuré pour les mortiers à caractère autoplaçant donne un coefficient de variation (C.O.V.) plus faible que celui obtenu pour les mortiers à caractère semi-fluide. L'inverse est remarqué concernant la mesure du temps d'écoulement à travers le V-funnel. Ceci indique que plus le temps d'écoulement est faible plus l'erreur engendré peut être importante du fait que la mesure du temps d'écoulement dépend de la fluidité du mélange. Pour la mesure des propriétés rhéologiques, il semble que l'erreur induite par la mesure du seuil de cisaillement est plus importante que celle de la viscosité plastique et ça peu importe la fluidité du mortier. D'autre résultats dans cette étude (§ 5.3) ont montré que plus la fluidité du mortier est faible (étalement inférieur à 150 mm) plus l'erreur engendré par la mesure du seuil de cisaillement est importante.

Tableau 3.4 Répétabilité des essais de caractérisation

	Étalement au mini cône (mm)		Temps $t_{V-funnel}$ (sec)		Propriétés rhéologiques				Ressuage forcé (%)	
					τ_0 (Pa)		μ_{pl} (Pa.s)			
Type de MBE	AP	SF	AP	SF	AP	SF	AP	SF	AP	SF
Nombre d'essais	5	5	5	5	5	5	5	5	3	3
Moyenne	264	210	2,91	5,59	14,8	24,6	3,57	7,51	6	22
Écart type	2,95	8,88	0,14	0,14	0,84	1,52	0,07	0,07	1,20	2,2
Coefficient de variation (%)	1,12	4,27	4,92	2,53	5,65	6,43	1,97	0,98	1,50	1,78

3.4.3 Caractérisation des bétons

Tous les bétons ont été caractérisés à l'état frais et à l'état durci. Le tableau 3.5 résume les différents tests effectués dépendamment du type de la consistance du béton (autoplaçant ou semi-fluide). Les BAP sont destinés pour la construction des bâtiments et le BSF sont des bétons à air entraîné destinés pour les infrastructures de transports.

3.4.3.1 Séquence de malaxage des bétons

Les bétons sont confectionnés dans une bétonnière électrique de capacité maximale de 110 L. La séquence de malaxage suivie est la suivante :

1. Homogénéiser le sable dans le malaxeur pendant 30 sec;
2. Corriger la quantité du sable, gros granulats (GG) et de l'eau en calculant l'humidité du sable et des GG;
3. Incorporer les GG dans le malaxeur + $\frac{3}{4}$ de la quantité d'eau et malaxer pendant 1 min;
4. Ajouter les poudres et malaxer pendant 30 sec;
5. Ajouter le reste de la quantité d'eau mélangée avec le superplastifiant et malaxer pendant 1 min;
6. Ajouter l'agent de viscosité (si utilisé) et continuer le malaxage pendant 3 min;
7. Repos de 2 min;
8. Re- malaxer pendant 2 min.

Comme les bétons semi-fluides sont des bétons à air entraîné, l'agent entraîneur d'air utilisé est mélangé avec le $\frac{1}{3}$ de l'eau de gâchage et introduit juste après les GG. Immédiatement après le malaxage, la température du béton est mesurée et les essais de caractérisation du béton à l'état frais sont effectués selon les normes en vigueur et les procédures décrites ci-dessous. Le volume du béton est suffisant pour pouvoir effectuer la série d'essais d'ouvrabilité et de rhéologie en un intervalle de temps court.

Tableau 3.5 Essais de caractérisation pour les deux types de bétons

	BAP (Bâtiments)	BSF (Infrastructures de transport)
À l'état frais	<ul style="list-style-type: none"> – Étalement, t_{50} et VSI à 10, 30, 60 et 90 min – J-Ring (16 barres) à 10, 30, 60 et 90 min – Masse volumique et teneur en air à 10 et 90 min – Seuil de cisaillement et viscosité plastique (ConTec 5) à 10, 30, 60 et 90 min – Colonne de ségrégation à 15 min – Thixotropie (palettes portatives) 	<ul style="list-style-type: none"> – Étalement, T_{40} et VSI à 10, 60 et 70* min – J-Ring (8 barres) à 10 et 70* min – L-Box (2 barres) et t_{40} à 10 min – Masse volumique et teneur en air à 10 et 70 min – Seuil de cisaillement et viscosité plastique (ConTec 5) à 10 et 70* min – Thixotropie (palettes portatives)
À l'état durci	<ul style="list-style-type: none"> – Résistance à la compression à 1, 28, 56j – Retrait de séchage suivi jusqu'à 1 an 	<ul style="list-style-type: none"> – Résistance à la compression à 1, 28, 56 et 91j – Module d'élasticité à 1, 28, 56 et 91j – Perméabilité aux ions chlorures à 28 jours – Retrait de séchage suivi jusqu'à 1 an – Écaillage – Gel-dégel

* à 70 min, la quantité de SP est ajustée pour atteindre l'étalement initial de 550 ± 20 mm

3.4.3.2 Étalement, t_{50} (ou t_{40}) et indice visuel de stabilité

Cet essai donne une indication sur la capacité du béton de se déformer sous l'effet de son poids propre, contre le frottement de la surface en absence de force externe (figure 3.12). Pour les BAP, cet essai est réalisé conformément à la norme ASTM C1611. Pour les BSF, un pilonnage de 10 coups est appliqué avant de soulever le cône [Leclerc, 2011]. Le temps nécessaire pour que le béton atteigne un diamètre de 500 mm pour les BAP (t_{50}) et un diamètre de 400 mm pour les BSF (t_{40}) est mesuré. Une fois que le béton stabilise de s'écouler, la moyenne des deux diamètres perpendiculaires de la galette est mesurée.

L'aspect de la galette, obtenue lors de l'essai d'étalement, est aussi examiné minutieusement quelques minutes après la stabilisation de l'écoulement, afin évaluer l'indice visuel de stabilité (VSI) du béton. Selon la norme ASTM C1611, le VSI varie de 0 pour les bétons stables jusqu'à 3 pour les bétons hautement instables (figure 3.13).

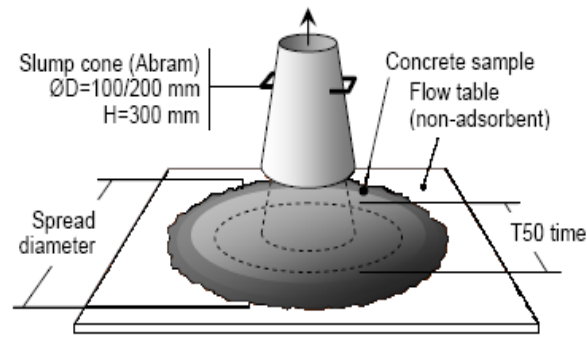


Figure 3.12 Essai d'étalement

3.4.3.3 J-Ring

L'essai de l'anneau en J (J-Ring) est un essai utilisé pour évaluer l'écoulement restreint et la résistance au blocage (ASTM C1621). Cet essai consiste à utiliser le cône d'Abrams avec un anneau en acier dont le diamètre est de 300 mm, auquel sont attachées 16 barres d'acier de 16 mm de diamètre et de 200 mm de hauteur. L'espacement net entre deux barres est de 43 mm. L'étalement du béton ainsi que la hauteur du béton au centre et juste après les barres d'acier sont mesurés. La capacité de passage du béton est d'autant plus grande que la différence de l'étalement sans et avec J-Ring est faible. Le tableau 3.6 donne une indication sur la capacité du blocage du béton à travers le J-Ring.

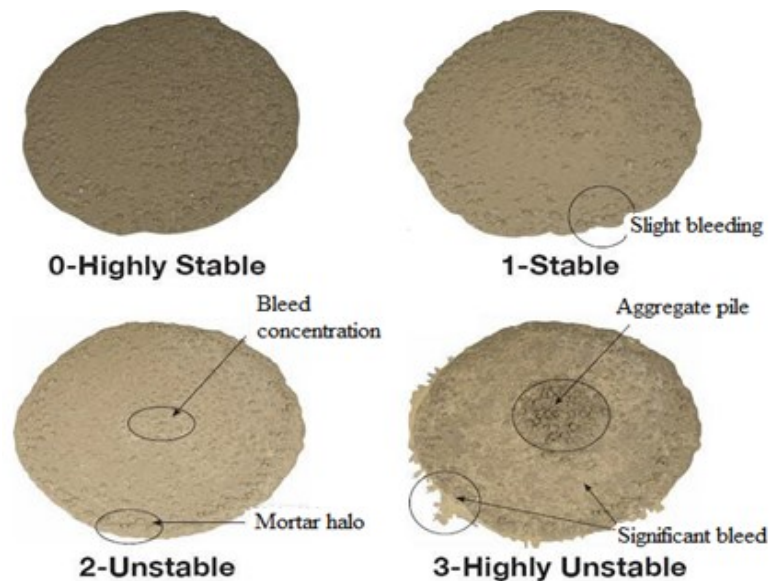


Figure 3.13 Indice visuel de stabilité (VSI) [BASF, 2015]

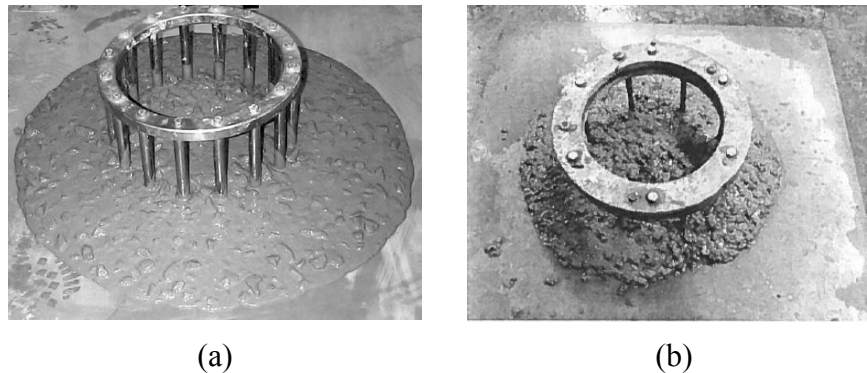


Figure 3.14 Essai J-Ring (a) avec 16 barres pour BAP et (b) avec 8 barres pour BSF

Par ailleurs, il est fortement recommandé de mesurer Δh qui est la moyenne des différences dans la hauteur du béton juste à l'intérieur (h_i) et à l'extérieur (h_e) du J-Ring, à quatre endroits autour de l'anneau [EFNARC, 2005]. Cette mesure n'est pas préconisée par la norme ASTM C1621, cependant, la différence entre l'étalement sans et avec l'anneau (J-Ring) ne donne pas une indication précise sur l'ampleur du blocage du béton à travers les barres d'armatures. Koehler et Fowler [2007] mentionnent qu'un Δh entre 1,25 et 2,5 cm peut être approprié pour des sections avec une densité modérée de ferrailage.

Pour les BSF, un anneau de huit barres est utilisé avec l'application d'un pilonnage de 10 coups avant de soulever le cône [Leclerc, 2011].

Tableau 3.6 Estimation du blocage à travers J-Ring selon ASTM C1621

Différence entre l'étalement et l'étalement à travers J-Ring	Estimation du blocage
0 à 25 mm	Pas de blocage visible
> 25 mm	Blocage minimal à notable
> 50 mm	Blocage important

3.4.3.4 L-Box et t_{40}

L'essai de la boîte en L est un autre essai utilisé pour évaluer l'écoulement restreint et la résistance au blocage des BSF. C'est un essai destiné pour les BAP. À cause de la consistance semi-fluide de ce béton, le nombre de barres est modifié à 2 barres de $\Phi = 12$ mm (donnant un espacement libre de 59 mm) au lieu de 3 barres préconisées par l'essai. Le test consiste à remplir la partie verticale de la boîte en L, représenté dans la figure 3.15, et à ouvrir la trappe

pour laisser le béton s'écouler dans la partie horizontale à travers les deux barres d'armatures. Le temps que le béton met pour atteindre la distance de 400 mm dans la partie horizontale est mesuré. Une fois le béton stabilisé dans la boîte, la hauteur du béton à la partie verticale H_1 et la hauteur du béton à la fin de la partie horizontale H_2 sont mesurées pour calculer la capacité de passage qui est H_2/H_1 . Comme les BSF nécessitent un minimum de vibration, alors le béton n'atteint pas la capacité de remplissage souhaitée. À travers les travaux de Leclerc [2011] effectués, entre autres, sur les protocoles d'essais des bétons semi-autoplaçants, il est préconisé d'appliquer une vibration par le biais d'une aiguille vibrante dans la partie verticale du L-Box. Les vibrations sont appliquées par palier de 5 secondes, jusqu'à l'obtention d'un taux de remplissage de 80%. Le tableau 3.7 résume la capacité de remplissage du BSF selon le temps de vibrations appliqué [Leclerc, 2011].

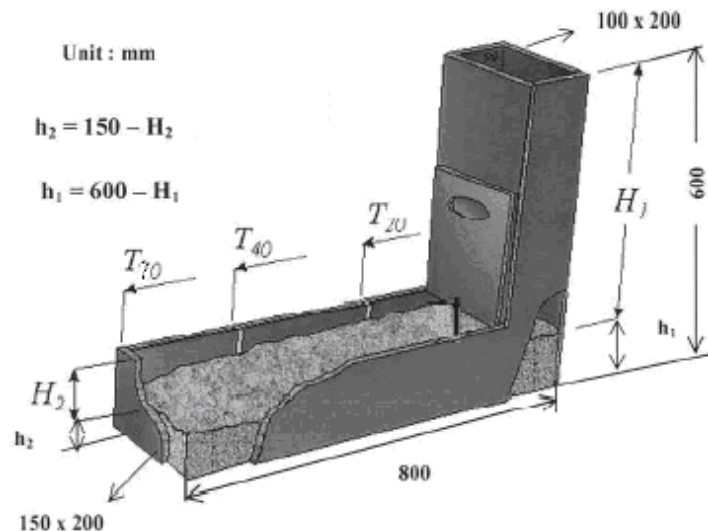


Figure 3.15 Dimensions du L-Box

Tableau 3.7 Capacité de remplissage des BSF en fonction du temps de vibration pour un taux de remplissage de 80%

Temps de vibrations (sec)	Estimation de la capacité de passage
0 à 5	Excellente
5 à 10	Admissible
Supérieur à 10	Remplissage insuffisant ou blocage de granulats

3.4.3.5 Teneur en air

La détermination du pourcentage d'air est effectuée selon la norme ASTM C231 dont le principe est de remplir un volume déterminé de béton, le mettre en pression dans un récipient hermétiquement fermé, pour comprimer l'air contenu dans le béton. La teneur en air est mesurée moyennant le manomètre.

3.4.3.6 Colonne de ségrégation

L'essai de la colonne de ségrégation est réalisé conformément à la norme ASTM C1610. Il s'agit de placer le béton dans une colonne cylindrique de 200 mm de diamètre et 660 mm de hauteur divisée en quatre compartiments égaux (figure 3.16). Pour les BSF, un pilonnage de 5 coups est appliqué [Sotomayor, 2012] alors qu'aucune consolidation n'est préconisée pour les BAP. Le béton est ensuite laissé au repos pendant 15 min. Le béton dans chaque section est récupéré, pesé puis lavé dans un tamis de 5 mm. Les granulats récupérés sont séchés puis pesés. L'indice de ségrégation est calculé selon la formule suivante :

$$S (\%) = 2 \times ((CA_B - CA_T) / (CA_B + CA_T)) \times 100 \quad (3.1)$$

avec CA_B et CA_T : masse des granulats à section bas et haut respectivement.

La norme ASTM C1610 ne fournit pas d'indications sur l'indice de ségrégation maximale admissible pour les BAP. Cependant, Koehler et Fowler [2007] ont comparé les résultats de l'essai de la colonne de ségrégation avec ceux de l'essai de stabilité au tamis. Les résultats ont montré qu'un indice de ségrégation de 15% pour la colonne de ségrégation correspond à un indice de ségrégation de 15% pour l'essai de stabilité de tamis (figure 3.17). Ce pourcentage est déjà jugé approprié pour l'essai de la stabilité au tamis [de Schutter, 2005; Testing-SCC, 2005].

De plus, Assaad et coll. [2004] recommande de prendre en considération le coefficient de variation de la masse des granulats par rapport à la masse du béton entre les quatre compartiments. Les auteurs démontrent qu'un C.O.V. entre 2 et 4% s'avère approprié pour une bonne résistance à la ségrégation.

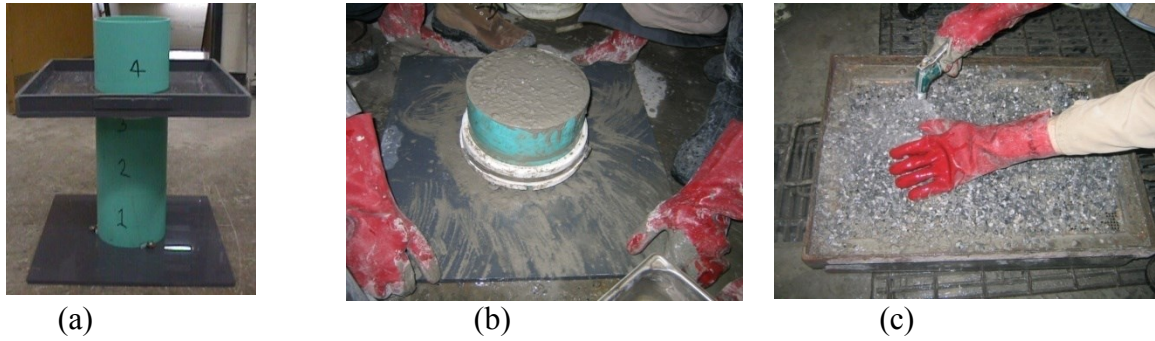


Figure 3.16 Essai de la colonne de ségrégation (a) dispositif, (b) récupération du béton de chaque compartiment, (c) lavage des granulats au tamis 5 mm

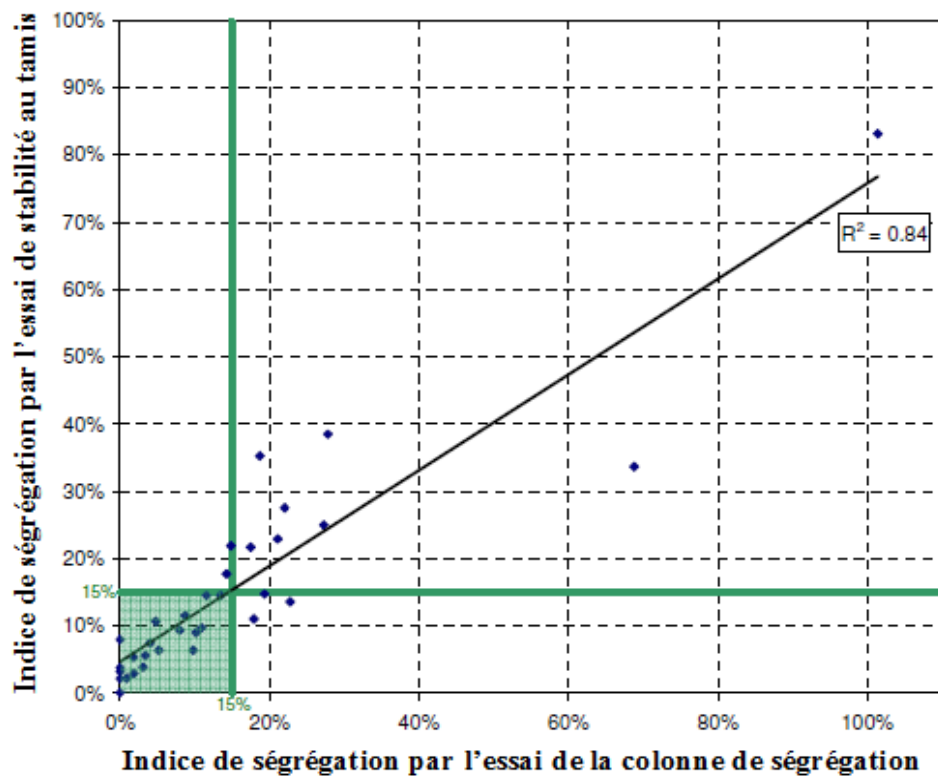


Figure 3.17 Relation entre l'essai de la colonne de ségrégation et l'essai de la stabilité au tamis [Koehler et coll., 2007]

3.4.3.7 Viscosimètre ConTec 5

Le viscosimètre ConTec 5 est utilisé pour la mesure des propriétés rhéologiques des bétons. C'est un viscosimètre destiné pour les bétons dont le diamètre maximal des particules est inférieur à 22 mm, et dont l'affaissement est environ 120 mm ou supérieur [ConTec, 2006].

Tout comme le ConTec 6, c'est un viscosimètre à cylindres coaxiaux, qui mesure la variation du couple résistant sous des vitesses angulaires variables. Les deux cylindres (intérieur et extérieur) comportent des nervures afin de prévenir le glissement du béton entre les parois des cylindres (figure 3.18). Les propriétés rhéologiques sont basées sur les paramètres fondamentaux du modèle de Bingham qui sont le seuil de cisaillement et la viscosité plastique. Ces paramètres sont calculés à partir de l'équation de Reiner-Rivlin.

Le protocole de mesure est contrôlé par le logiciel FreshWin dont les paramètres peuvent être ajustés selon les besoins (figure 3.19). Les mesures commencent par un cisaillement préalable avec une vitesse de 0,5 tr/s, après le niveau de vitesse diminue progressivement pour effectuer l'enregistrement des données sur une courbe de paliers descendants des gradients de vitesse. La valeur retenue pour chaque palier est la moyenne des mesures stabilisées. Les paramètres de mesures utilisés pour les deux types de bétons sont présentés dans le tableau 3.8.

Comme décrit au § 3.3.2.6, la tendance du mélange a présenté une ségrégation pouvant être évaluée avec l'indice de ségrégation qui est considéré comme la variation de la viscosité plastique pendant le test [ConTec, 2006].

Tableau 3.8 Protocole de mesure suivi pour les BAP et les BSF

Type de béton	Vitesse rotation minimale (tour/sec)	Vitesse de rotation maximale (tour/sec)	Nombre de paliers	Temps de mesure/palier (sec)	Nombre de points
BAP	0.1	0.5	7	5	50
BSF	0.025	0.5	10	5	50

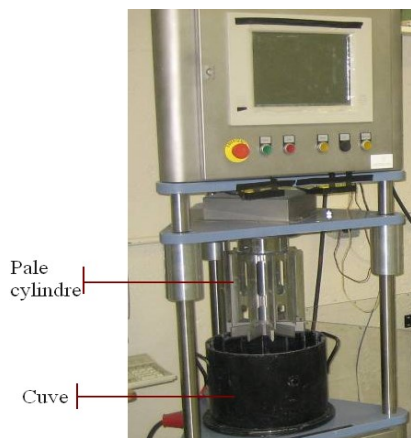


Figure 3.18 Viscosimètre ConTec 5 pour bétons

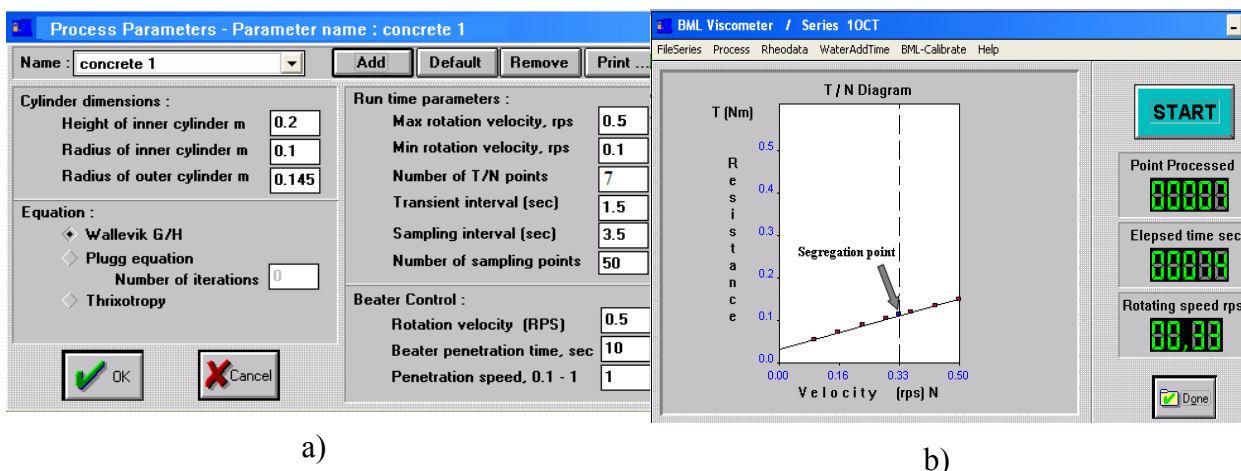


Figure 3.19 a) Paramètres d'entrée dans le logiciel FreshWin, b) Les données de sortie

3.4.3.8 Palettes portatives (thixotropie)

La thixotropie des bétons validés est évaluée en utilisant l'approche basée sur la détermination du degré de restructuration du béton après un certain temps de repos. Ceci se fait en mesurant le taux d'augmentation dans le seuil de cisaillement statique au repos. Le degré de restructuration du béton est déterminé par l'essai des palettes portatives [Omran et coll., 2011]. Cet essai consiste à placer au centre de quatre cuves, de section carrée, quatre palettes en forme de croix, de différentes dimensions (figure 3.20), puis remplir chaque cuve de béton jusqu'à la hauteur de la palette. Les cuves sont ensuite couvertes par des couvercles munis d'un trou au milieu, dont le diamètre est supérieur de 2 mm de celui de la tige des palettes, permettant ainsi de maintenir les palettes en position verticale bien centrée. Les quatre cuves sont laissées pour des périodes de repos de 15, 30, 45 et 60 min, respectivement.

Les palettes sont utilisées en ordre décroissant de dimensions pour un ordre croissant de temps. Ceci est dû au fait que le béton développe une restructuration plus importante avec l'augmentation du temps de repos, donc la déstructuration du béton est plus facile grâce à la diminution de la surface à cisailier. Les dimensions (hauteur et rayon) pour chaque palette sont :

- Palette 1: 250 et 37.5 mm (la plus grande dimension)
- Palette 2 : 200 et 37.5 mm ;

- Palette 3: 149 et 37.5 mm ;
- Palette 4: 100 et 37.5 mm (la plus petite dimension).

À la fin de chaque temps de repos, un moment de torsion est appliqué sur la tige de la palette, à l'aide d'un torque-mètre, avec une vitesse constante de 10 à 15 secondes par quart de tour. Le moment de torsion maximal (T_{\max}) pour la déstructuration totale du béton est obtenu en N.m. La contrainte de cisaillement statique est calculée par l'équation (3.2) :

$$\tau_{0\text{repos}} = \frac{T_{\max}}{K} \quad (3.2)$$

où $K = 2\pi r^2(h + 1/3r)$; h et r sont la hauteur de remplissage du béton (qui est la hauteur de la palette) et le rayon de la palette en mètre, respectivement.

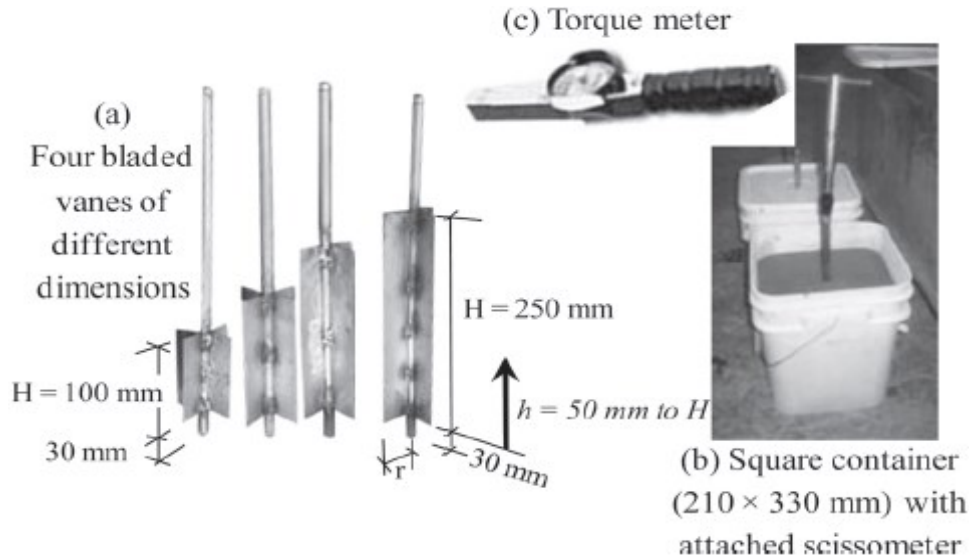


Figure 3.20 Dispositif de l'essai de thixotropie par palettes portatives [Omran et coll., 2011]

Les valeurs des contraintes de cisaillement sont tracées en fonction des temps de repos, respectifs, afin de déterminer la pente qui correspond à la restructuration du béton au repos $PV_{\tau 0\text{repos}}(t)$. Une classification du degré de thixotropie selon l'essai des palettes portatives est représentée dans le tableau 3.9.

Tableau 3.9 Classification de la thixotropie avec les palettes portatives [Omran et coll., 2011]

Classification de la thixotropie	PV _{τ0repos} (Pa/min)
Faible thixotropie	0 – 25
Thixotropie modérée	25 – 50
Thixotropie modérée – élevée	50 – 75
Thixotropie élevée	75 – 100
Thixotropie très élevée	100 – 125

3.4.3.9 Échantillonnage et mûrissement des échantillons

Dépendamment du type de béton (BAP ou BSF), un échantillonnage est effectué pour différents essais à l'état durci (tableau 3.4). Pour les BAP, aucune consolidation n'est appliquée lors de l'échantillonnage; tandis que pour les BSF, la consolidation appliquée est équivalente à 40% à celle recommandée dans les normes ASTM pour les différents essais sur le béton conventionnel [Sotomayor Cruz, 2012]. Le nombre de couches et le pilonnage appliqué pour chaque test sont résumés dans le tableau 3.10.

Les échantillons dans leurs moules sont bien couverts avec un film en plastique et laissés dans les conditions normales du laboratoire ($T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ et $\text{HR} = 5\%$). Au bout de 24 heures, les échantillons destinés aux essais de retrait de séchage et les essais de gel-dégel sont démoulés et mis en position verticale dans des contenants d'eau saturée de chaux. Ces derniers sont conservés avec le reste des échantillons dans une salle de mûrissement à une température de $23\text{ }^{\circ}\text{C}$ et 100% d'humidité relative.

Tableau 3.10 Protocole d'échantillonnage appliqué pour les essais des BSF
[Sotomayor Cruz, 2012]

Essai	Protocole d'échantillonnage pour les BSF
Étalement	Une couche, 10 coups
J-Ring (8 barres)	Une couche, 10 coups
L-Box (2 barres)	Vibration (paliers de 5 secondes)
Colonne de ségrégation	Une couche, 5 coups
Air et masse volumique	Deux couches, 10 coups/couche
Résistance à la compression 1, 28, 56 et 91 j	Une couche, 10 coups
Module d'élasticité	Une couche, 10 coups
Retrait par séchage	Deux couches, 12 coups/couche
Perméabilité aux ions de chlorure	Deux couches, 10 coups/couche
Écaillage	Une couche, 20 coups
Gel-dégel	Deux couches, 15 coups/couche

3.4.3.10 Résistance à la compression

La résistance à la compression est mesurée sur des cylindres de 100×200 mm, conformément à la norme ASTM C39. Les mesures sont effectuées à l'âge de 1, 28, 56 et 91 jours. La moyenne de trois cylindres est prise pour chaque béton. Avant d'effectuer l'essai de compression, les surfaces des cylindres sont misent à niveau soit par l'application du soufre ou en utilisant la machine de surfacage. Une machine de compression ayant une capacité maximale de 1112 kN (250000 lbf) est utilisée avec une application d'un taux de chargement de 0,28 MPa/sec (500 lb/sec).

3.4.3.11 Retrait de séchage

L'essai de retrait de séchage est effectué conformément à la norme ASTM C157. Des échantillons de 75×75×285 mm sont fabriqués et démoulés à $23 \pm 0,5$ heures. La première mesure de la longueur, utilisant un comparateur, est prise après avoir immergé les échantillons dans l'eau saturée de chaux pendant 30 minutes. Ensuite, les échantillons sont retournés dans l'eau saturée de chaux et conservés dans une salle de mûrissement à 100% d'humidité relative et $23 \text{ }^{\circ}\text{C}$ pendant 28 jours. À cet âge, les échantillons sont ressortis et une mesure de la longueur est prise avant de les conserver à l'air dans une salle à une température de $23 \pm 2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ et une humidité relative de $50 \pm 4\%$. Les mesures de changement de longueur sont effectuées à 4, 7, 14, 28 jours puis chaque mois jusqu'à une année. Le retrait de séchage est calculé en pourcentage de la longueur initiale de l'échantillon et des mesures prises par la formule :

$$\Delta L_x = (\text{CRD} - \text{Initial CRD}) / G \times 100 \quad (3.3)$$

où ΔL_x : retrait (%);

CRD : lecture du comparateur à l'âge de la mesure (mm);

Initial CRD : lecture du comparateur après le démoulage (mm);

G : longueur de la tige de calibration (mm).

3.4.3.12 Perméabilité aux ions de chlorure

Cet essai porte sur la détermination de la conductivité électrique du béton qui donne une indication rapide de la résistance du béton à la pénétration des ions de chlorure. L'essai est réalisé conformément à la norme ASTM C1202. Il s'agit de placer deux échantillons, de 95 mm de diamètre et 50 mm d'épaisseur entre deux chambres contenant des solutions, la première contient 3% de NaCl et la deuxième solution contient 0,3N de NaOH. Les échantillons sont ensuite maintenus sous une différence de potentiel de $60 \pm 0,1$ V pendant 6 heures, la charge électrique qui passe à travers l'échantillon est enregistrée chaque 30 min.

Une échelle est établie dans la norme ASTM C1202, qui permet de qualifier la perméabilité des bétons aux ions de chlorure à partir de la valeur du courant enregistré lors de l'essai (tableau 3.11).

Tableau 3.11 Échelle de la perméabilité aux ions de chlorure tirées de la norme ASTM C1202

Charge (Coulombs)	Perméabilité aux ions de chlorure
> 4000	Élevée
2000 – 4000	Modérée
1000 – 2000	Faible
100 – 1000	Très faible
< 100	Négligeable

3.4.3.13 Résistance à l'écaillage

Il s'agit de déterminer la résistance à l'écaillage d'une surface horizontale de béton exposée à des cycles de gel-dégel en présence des sels de déverglaçage. L'essai est réalisé selon la norme ASTM C672. Deux échantillons sont préparés pour chaque béton dont les dimensions sont présentées sur la figure 3.21. Il est important d'appliquer un léger brossage sur la surface du béton pendant que ce dernier est encore frais. Après le démoulage, à 24 heures, les plaques sont muries pendant 42 jours dans une salle à 100% d'humidité relative. Les échantillons sont ensuite conservés à l'air dans une chambre à une température de 23 ± 2 °C et une humidité relative de $50 \pm 5\%$ pour 7 jours. À 49 jours, un cadrage est collé avec de la silicone sur le périmètre de l'échantillon de manière à former un réservoir étanche, puis une solution saline de 3% de NaCl est appliquée pendant 7 jours. Les cycles de gel-dégel débutent à 56 jours, dont un cycle consiste en une période de gel de 17 ± 1 h à une température de -18 °C suivie

d'une période de dégel de $8h \pm 1 h$ à une température de $23 \pm 2 ^\circ C$ et une humidité relative de $50 \pm 5\%$. Ce cycle est fait au moins 50 fois sans interruption.

L'écaillage est mesuré après 5, 10, 15, 25, et 50 cycles. Pour chaque mesure, la surface de la plaque est rincée avec de l'eau claire et les débris d'écaillage sont récupérés, lavés, tamisés sur un tamis de $80 \mu m$, puis séchés pendant 48 heures avant d'être pesés. Les résultats de la masse des débris d'écaillage sont exprimés en g/m^2 . Après chaque mesure, l'état de la surface de la plaque est examiné visuellement afin d'attribuer une classe d'écaillage, tel qu'il est décrit dans le tableau 3.12. Après chaque prélèvement de débris écaillés, une nouvelle solution saline de 3% de NaCl est appliquée.

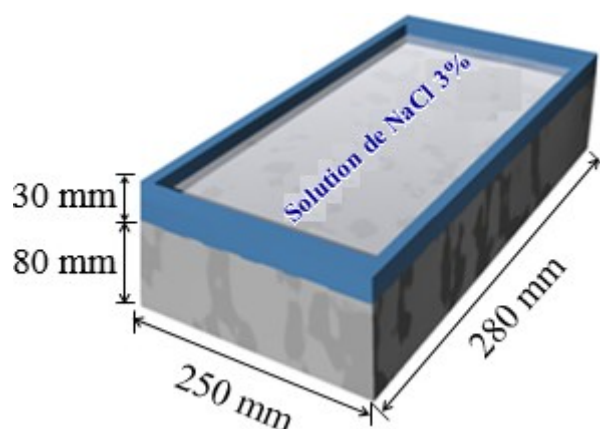


Figure 3.21 Dimension de l'échantillon utilisé pour l'essai d'écaillage

Tableau 3.12 Classification qualitative de la surface écaillée (ASTM C672)

Classe	Condition de la surface
0	Aucun écaillage
1	Écaillage très léger (3 mm de profondeur, pas de gros granulats visibles)
2	Écaillage léger à modéré
3	Écaillage modéré
4	Écaillage modéré à sévère
5	Écaillage sévère (gros granulats visible sur la surface totale)

3.4.3.14 Résistance aux cycles de gel-dégel

La résistance des BSF (bétons à air entraîné) à des cycles de gel-dégel est évaluée conformément à la norme ASTM C666, selon la procédure A (cycle gel-dégel dans l'eau). Pour chaque béton, deux prismes de $75 \times 75 \times 350$ mm sont confectionnés. Après le démoulage,

les prismes sont conservés 14 jours dans de l'eau saturée en chaux. Au bout de 14 jours, les échantillons sont apportés à la température de dégel (entre $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$ et $2\text{ }^{\circ}\text{C}$). Les échantillons subissent six cycles de gel-dégel par jour dont la température varie de $[-18\text{ à }4\text{ }^{\circ}\text{C}] \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Des mesures de perte de masse, l'allongement des échantillons et la vitesse de passage d'une onde ultrasonique entre les extrémités des échantillons sont effectués dans les conditions de dégel et à des intervalles ne dépassants pas 36 cycles d'exposition aux cycles gel-dégel. L'essai prend fin lorsque l'allongement de l'échantillon dépasse 0,1% (1000 $\mu\text{m/m}$).

3.5 CONCLUSIONS

Ce chapitre a présenté le programme expérimental suivi pour atteindre les objectifs fixés pour cette étude. Un nombre assez important de mortiers et de bétons a été examiné. Il s'agit de 102 MBE dans la phase des systèmes binaires (1 type ciment, 6 AM, 2 fillers calcaires ; 2 rapports E/P ; 2 types de SP) ainsi que 248 MBE pour des systèmes ternaires (20 différentes combinaisons, chaque combinaison comporte au minimum 12 MBE avec SP ajusté pour avoir une fluidité donnée). De plus, il faut noter que pour les MBE dont l'étalement est fixe, le dosage total en SP requis est introduit initialement (à 2 min), et lorsque la fluidité n'est pas adéquate le mélange est répété autant de fois que nécessaire jusqu'à l'obtention de la consistance souhaitée. C'est une sévérité qui s'avère nécessaire pour réduire les risques de sursaturation, ségrégation ou d'autres anomalies inexplicables des mélanges.

Ce travail compte aussi près de 50 mélanges de béton comprenant les bétons testés pour la sélection des adjuvants ainsi que les bétons validés avec et sans air entraîné. L'évolution du comportement rhéologique est suivie jusqu'à 90 min pour les BAP, et jusqu'à 60 min pour les BSF après le contact E/P. Pour faciliter la suite des idées des différents tests, certains essais effectués à l'échelle des coulis, comme les mesures de la compacité par voie humide et les dosages en saturation pour les deux types de SP et en présence des AM n'ont pas été cités dans ce chapitre. Plus de détails se trouvent dans le chapitre 6.

CHAPITRE 4 : CARACTÉRISATION DES MATÉRIAUX ET MÉLANGES DE RÉFÉRENCE

4.1 INTRODUCTION

Dans ce chapitre, il s'agit d'exposer la caractérisation de tous les matériaux utilisés dans cette étude (ciment, AM, fillers, granulats et adjuvants), puis de présenter les différents mélanges de référence à partir desquels l'étude est faite. Deux types de bétons sont étudiés dans cette thèse, à savoir les BAP pour la construction de bâtiments et les BSF pour la construction des infrastructures de transport. La fluidité des différents mélanges est assurée par l'ajout d'un superplastifiant (SP). Deux types de SP sont considérés : un SP à base de polynaphtalènes sulfonés et un SP à base de polycarboxylates. Dans le cadre de cette étude, l'utilisation d'un agent de viscosité (AV) s'est avérée nécessaire pour les BAP. Donc, il était nécessaire de trouver les bonnes combinaisons afin d'établir un bon compromis entre la fluidité et la stabilité. Le problème de la robustesse des BAP est aussi traité dans ce chapitre qui justifiera la composition des mélanges de référence.

4.2 CARACTÉRISATION DES MATÉRIAUX

Les matériaux utilisés dans le cadre de cette étude sont présentés ci-dessous. Les différents AM, fillers ainsi que les adjuvants chimiques sont choisis en collaboration avec des partenaires industriels de la chaire industrielle sur les bétons à haute performance fluides à rhéologie adaptée (BHPFRA). Le choix est basé sur la diversification des propriétés physiques ainsi que la composition chimique des matériaux. Le tableau 4.1 résume les AM et les fillers sélectionnés, leurs désignations ainsi que leurs propriétés physiques. Ces matériaux sont des produits commerciaux couramment utilisés dans le marché canadien du béton. Le ciment utilisé est d'un ciment portland de type GU.

La composition chimique du ciment, des différents AM et des fillers est résumée dans le tableau 4.2 et la distribution de la taille des particules est présentée sur la figure 4.1.

Tableau 4.1 Identification et propriétés physiques des différents ajouts minéraux et fillers

Nature	Type	Désignation	Densité (g/cm ³)	D50 (µm)	Surf. Blaine (m ² /kg)	Surf. BET (m ² /g)	Forme des particules
Ciment	GU	Ciment	3,14	15	390	1,38	Angulaire allongée
Cendre volante	Classe F	CV-F	2,36	10	350	1,17	Sphérique
	Classe C	CV-C	2,15	10	400	1,67	Sphérique
Laitier	Finesse élevée	L120	2,93	8	410	0,97	Angulaire allongée
	Finesse modérée	L100	2,92	11	330	0,68	Angulaire allongée
Filler calcaire	Finesse élevée	CC3	2,70	3	865	2,29	Semi-arrondi
	Finesse modérée	CC35	2,72	35	215	0,36	Angulaire plate
Fumée de silice	-	FS	2,24	0,2	-	18,3	Sphérique
Métakaolin	-	MK	2,5	4	1215	12	Semi-angulaire

Tableau 4.2 Caractéristiques physico-chimiques du ciment et des ajouts minéraux

Composition (%)	Ciment GU	CV-F	CV-C	Laitier		Filler		FS	MK
				L120	L100	CC3	CC35		
Analyse chimique (%)									
Al ₂ O ₃	5,07	25,9	23,4	10,98	11,04	1,08	0,16	0,13	30,4
SiO ₂	20,9	51,4	54,8	35,70	35,88	2,81	3,88	96,4	63,6
Fe ₂ O ₃	2,07	11,9	3,50	0,46	0,56	0,27	0,16	0,11	1,19
CaO	63,7	2,70	11,4	42,1	42,2	56,1	55,5	0,41	0,48
MgO	2,06	0,80	1,13	10,0	10,0	0,78	1,63	0,25	0,49
SO ₃	3,33	0,59	0,20	0,80	0,74	0,05	0,05	-	0,06
Na ₂ O _{eq.}	0,89	1,78	3,29	0,46	0,43	0,14	0,01	0,35	1,31
Perte au feu	0,97	2,09	0,67	-1,81	-2,08	38,6	38,6	1,82	0,99
Phase minérale (%)									
C ₃ S	53,98	-	-	-	-	-	-	-	-
C ₂ S	19,20	-	-	-	-	-	-	-	-
C ₃ A	9,93	-	-	-	-	-	-	-	-
C ₄ AF	6,29	-	-	-	-	-	-	-	-

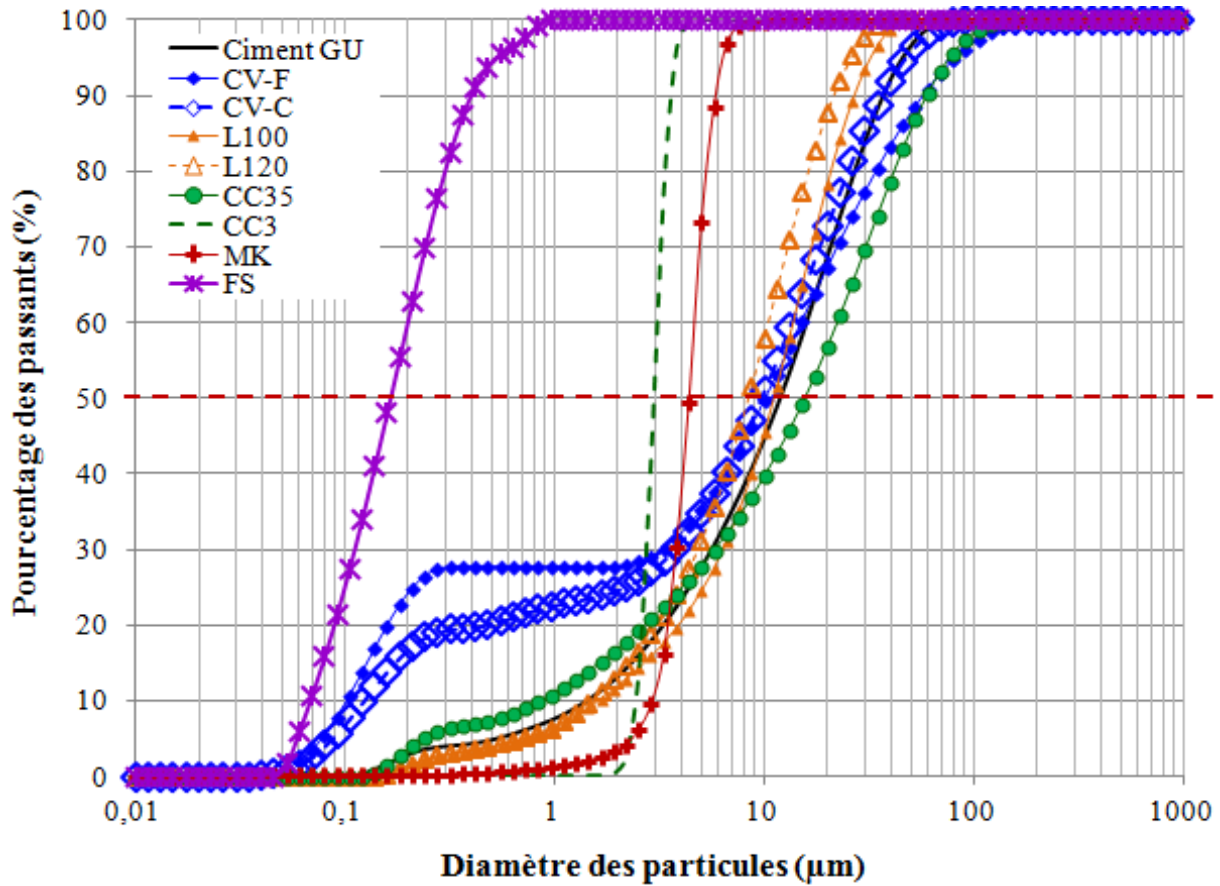


Figure 4.1 Granulométrie du ciment, des ajouts minéraux

4.2.1 Ciment

Tous les bétons et les MBE sont produits à partir du ciment type GU dont les propriétés physico-chimiques sont résumées dans le tableau 4.1. La taille moyenne des particules de ciment est de 15 μm et leur forme est généralement une forme angulaire allongée (figure 4.2). Le spectre de DRX du ciment après traitement SAL est présenté sur la figure 4.3. Ce spectre illustre la présence de C3A, C4AF, gypse, hémihydrate, calcite, quartz et anhydrite.

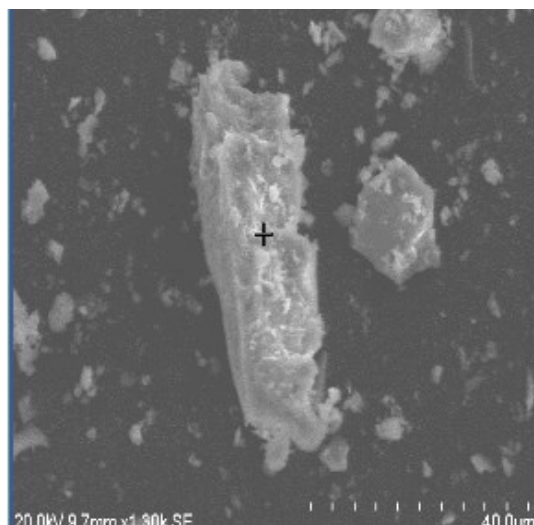


Figure 4.2 Photo des grains de ciment par MEB

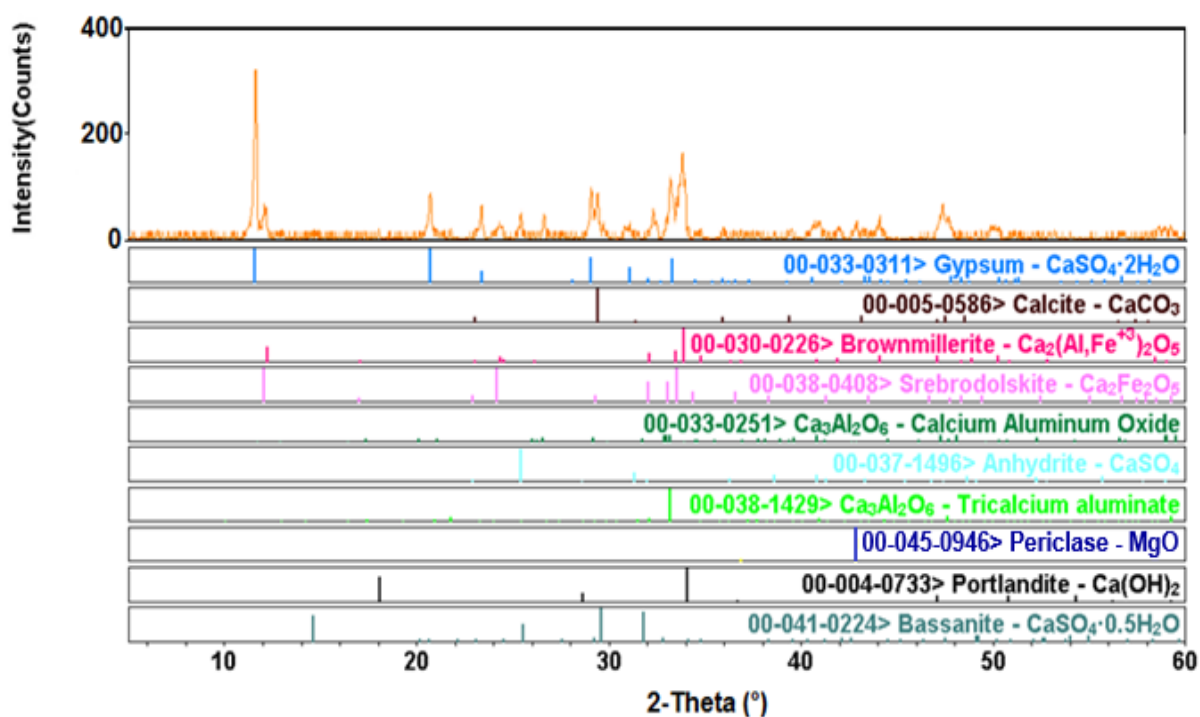


Figure 4.3 Spectre de DRX du ciment GU traité à l'acide salicylique

4.2.2 Cendres volantes

Deux types de cendre volante (CV) sont étudiés. La cendre volante de type F, qui se caractérise par une faible teneur en CaO, et la cendre volante de type C, qui se caractérise par une teneur en CaO qui peut dépasser 10%. La composition chimique ainsi que les propriétés physiques des deux cendres sont présentées dans les tableaux 4.1 et 4.2. D'après la figure 4.1, les deux cendres volantes présentent une distribution granulométrique bimodale. Les photos prises par MEB mettent en évidence la forme sphérique des deux cendres volantes (figure 4.4). De plus, avec le MEB il était possible de déterminer la taille moyenne des particules qui est de 10 μm pour les deux types de cendres. Le spectre de DRX des deux cendres est présenté dans les figures 4.5 et 4.6. Les deux cendres sont partiellement cristallisées avec quelques phases cristallines qui apparaissent comme le quartz, la mullite et l'hématite.

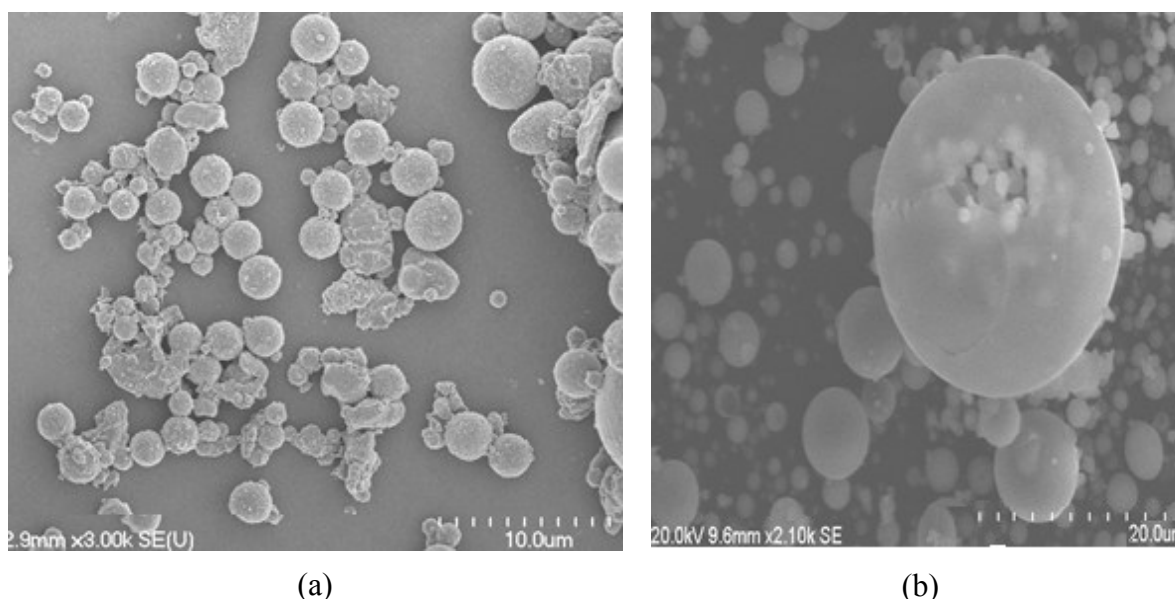


Figure 4.4 Photo des grains de cendre volante par MEB (a) CV-F (b) CV-C

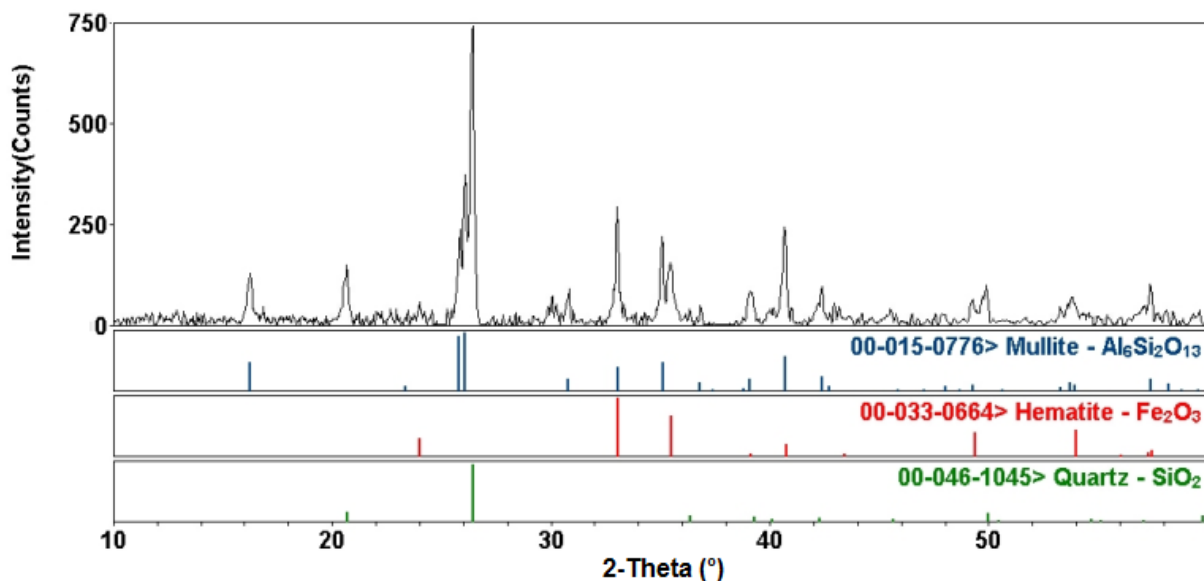


Figure 4.5 Spectre de DRX de la CV-F

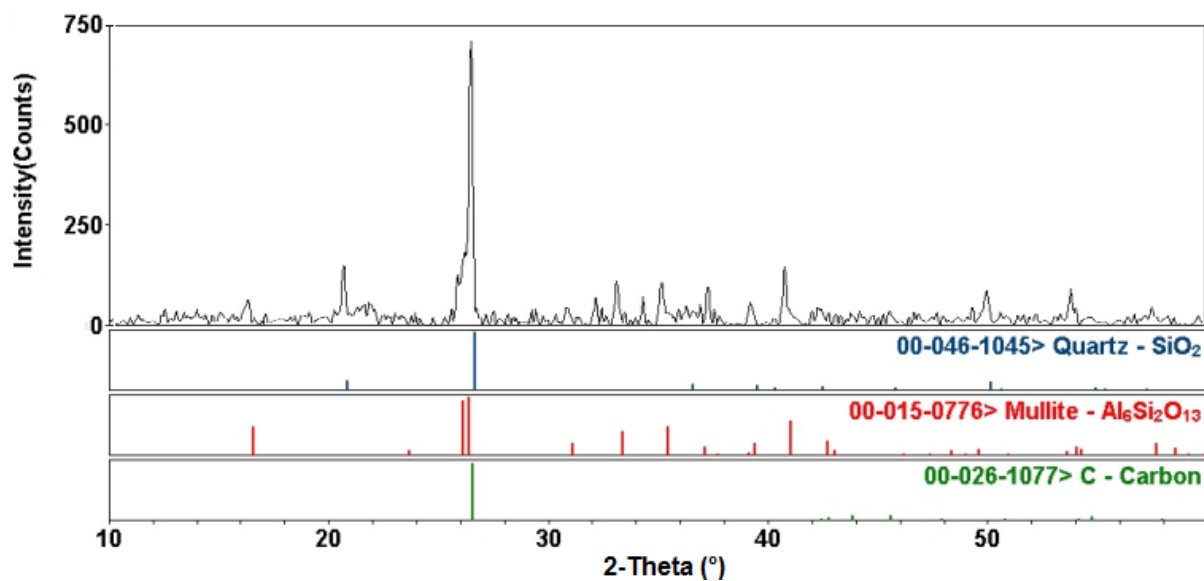


Figure 4.6 Spectre de DRX de la CV-C

4.2.3 Laitiers

Deux laitiers avec différentes finesses sont utilisés. Leur granulométrie est présentée dans la figure 4.1. Le premier laitier a une finesse modérée de 330 m²/kg et une taille moyenne des particules de 11 µm, commercialisé sous le nom grade 100. Le deuxième laitier est plus fin avec une finesse Blaine de 410 m²/kg et une taille moyenne des particules de 8 µm, commercialisé sous le nom grade 120. Les deux laitiers sont couramment utilisés sur le marché canadien du béton, leurs compositions chimiques sont très semblables (tableau 4.2). Des formules basées sur l'expérience existent pour lier la composition chimique des laitiers avec leur réactivité [Saric-Coric, 2001] dont certaines sont présentées dans le tableau 4.3. Comme les deux laitiers présentent des compositions chimiques très semblables alors pareillement leurs modules hydrauliques sont très proches. Ce qui veut dire que les deux laitiers peuvent présenter une réactivité similaire.

L'observation au MEB des particules des deux laitiers a montré qu'ils ont une forme angulaire allongée (figures 4.7-a et 4.7-b). Les spectres de DRX correspondant à chacun des deux laitiers sont présentés dans les figures 4.8 et 4.9. Les spectres démontrent bien que les deux laitiers sont bien vitrifiés avec la présence des cristallites d'oxyde d'aluminium de calcium.

Tableau 4.3 Modules hydrauliques des laitiers étudiés [Saric-Coric, 2001]

Module hydraulique	Laitier L100	Laitier L120
$\text{CaO} / \text{SiO}_2 > 1$	1,18	1,18
$(\text{CaO} + \text{MgO}) / \text{SiO}_2 > 1$	1,45	1,46
$(\text{CaO} + \text{MgO} + \text{Al}_2\text{O}_3) / \text{SiO}_2 \geq 1,5$	1,76	1,77
$(\text{CaO} + \text{MgO}) / (\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3) > 1,15$	1,11	1,12
$(6 \text{ CaO} + 3 \text{ Al}_2\text{O}_3) / (7 \text{ SiO}_2 + 4 \text{ MgO})$	0,98	0,98
$(\text{CaO} + \text{MgO} + 0,33 \text{ Al}_2\text{O}_3) / (\text{SiO}_2 + 0,67 \text{ Al}_2\text{O}_3) \geq 1$	1,29	1,29

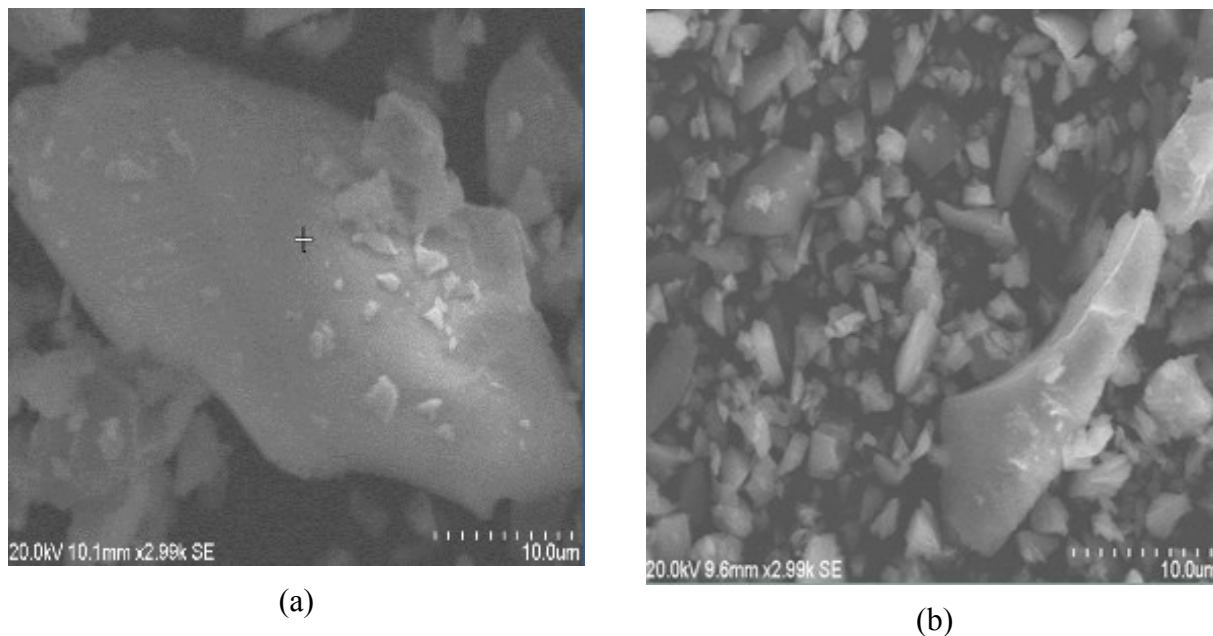


Figure 4.7 Morphologie des grains des laitiers par MEB (a) L100 (b) L120

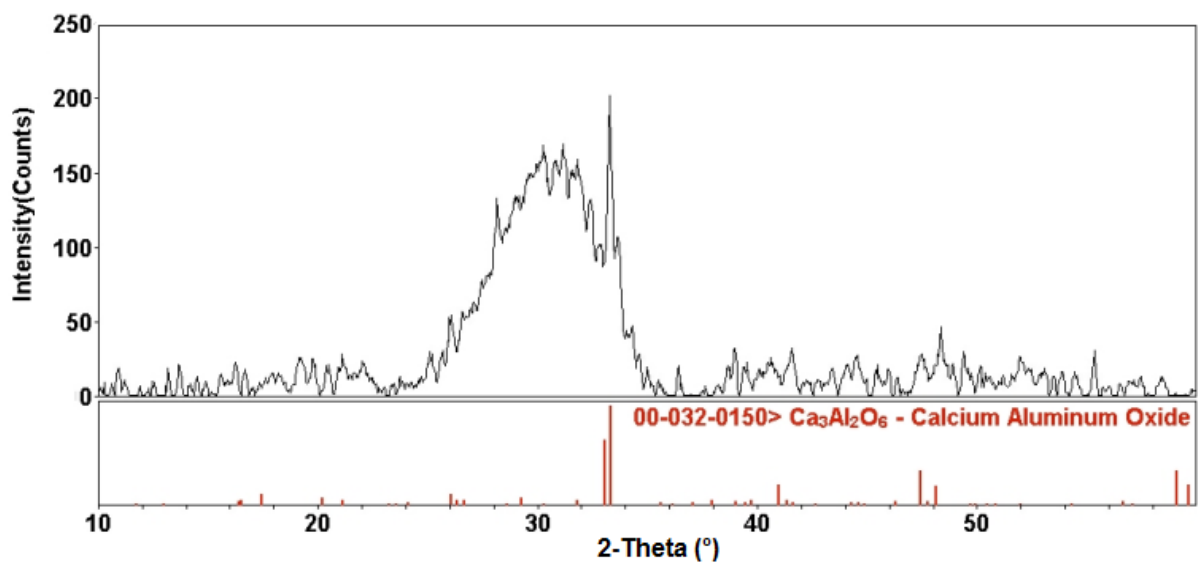


Figure 4.8 Spectre de DRX L100

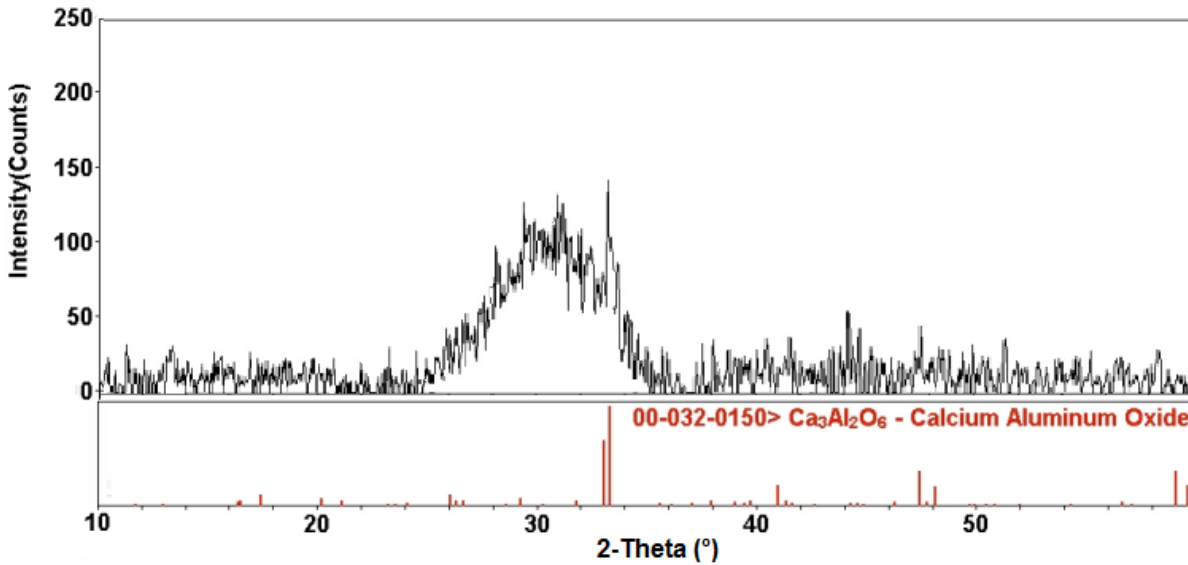


Figure 4.9 Spectre de DRX L120

4.2.4 Fillers

Deux fillers calcaires avec différentes finesses sont utilisés. Le premier filler (CC35) est assez grossier avec une finesse Blaine de 215 m²/kg et un diamètre moyen des particules de 35 µm (figure 4.1), commercialisé sous le nom Bétocarb 35. Le deuxième filler (CC3) est beaucoup plus fin et est couramment utilisé dans l'industrie du béton sous le nom Bétocarb 3. Sa finesse est de 865 m²/kg et le diamètre moyen des particules est de 3 µm (figure 4.1). D'après l'analyse fait par le MEB, le CC35 a une forme angulaire plate alors que le CC3 a une forme semi-arrondie (figures 4.10-a et 4.10-b). Les figures 4.11 et 4.12 présentent les spectres de DRX des deux fillers. Les deux spectres montrent bien que les deux fillers sont composés principalement de calcite (carbonate de calcium) avec quelque trace de quartz.

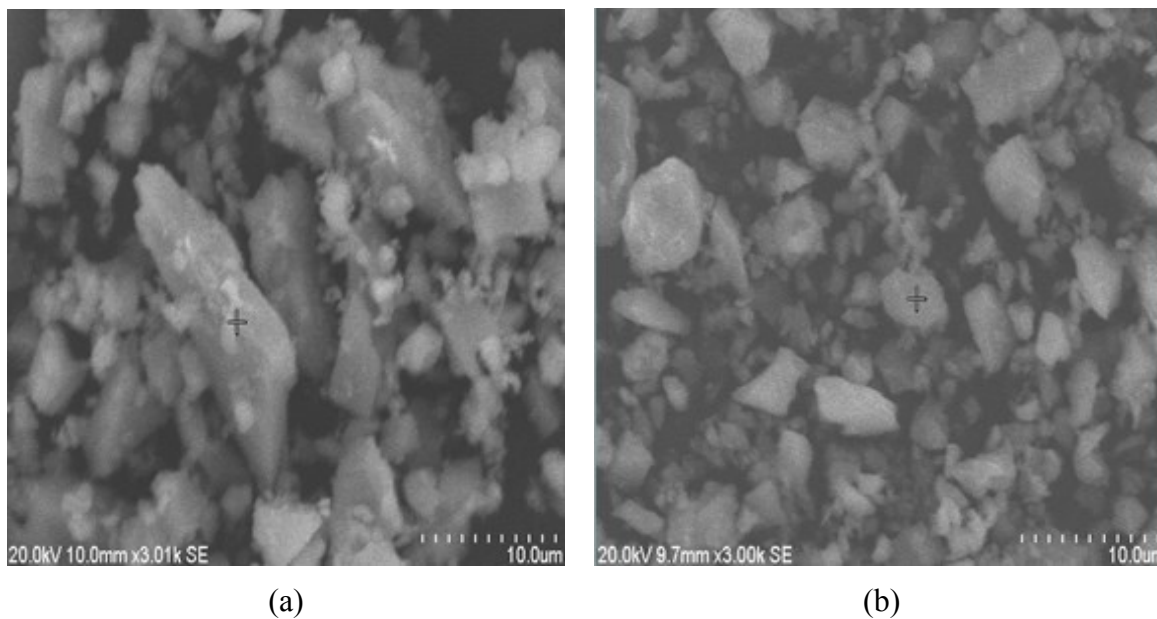


Figure 4.10 Photo des grains des fillers par MEB (a) CC35 (b) CC3

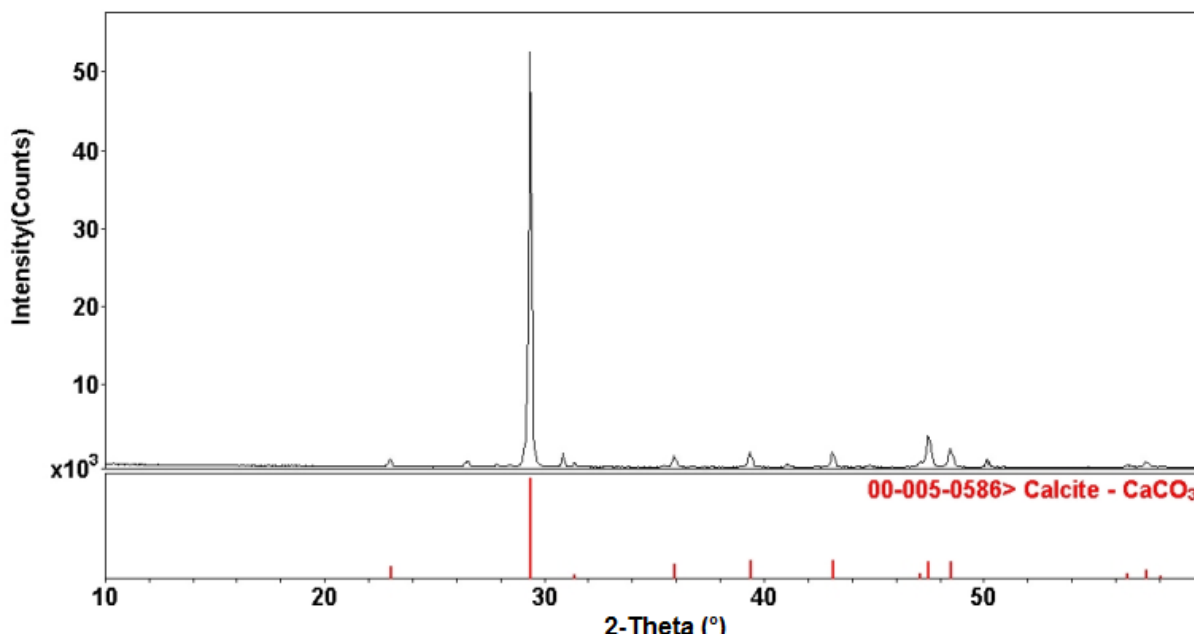


Figure 4. 11 Spectre de DRX CC35

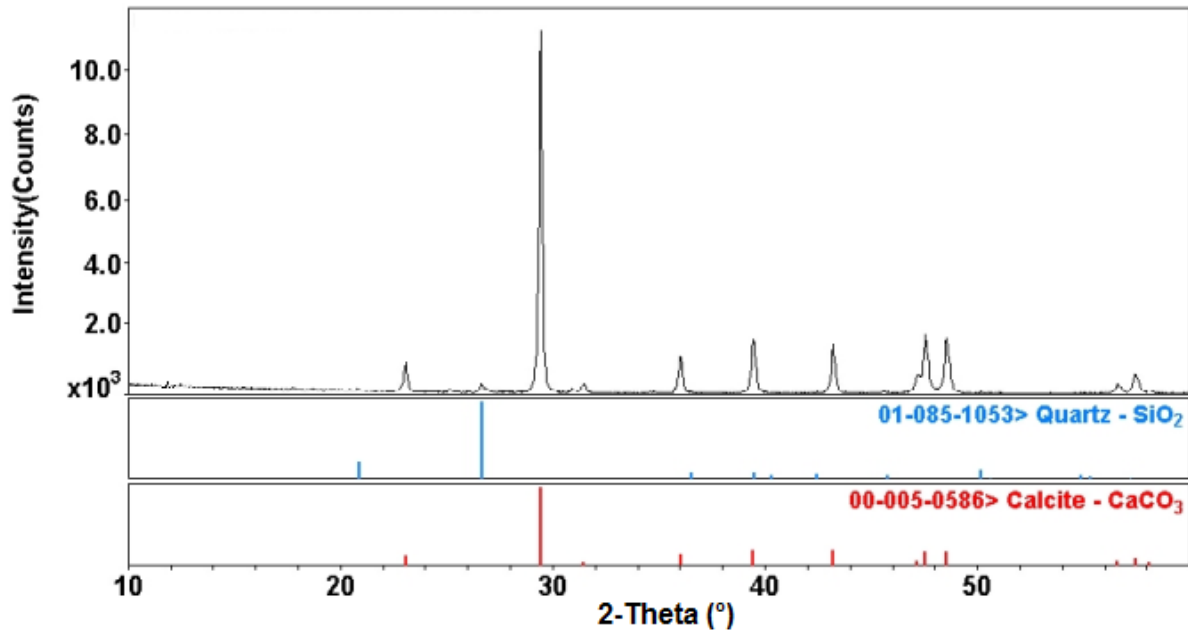


Figure 4.12 Spectre de DRX CC3

4.2.5 Métakaolin

Le métakaolin (MK) utilisé est commercialisé sous le nom « whitemud^{MK} ». Les propriétés physiques et la composition chimique de ce MK sont résumées dans les tableaux 4.1 et 4.2. La taille moyenne des particules est de 4 μm avec une forme semi-angulaire (figure 4.13). Le spectre de DRX révèle que ce MK a des phases cristallines de quartz et de carbone.

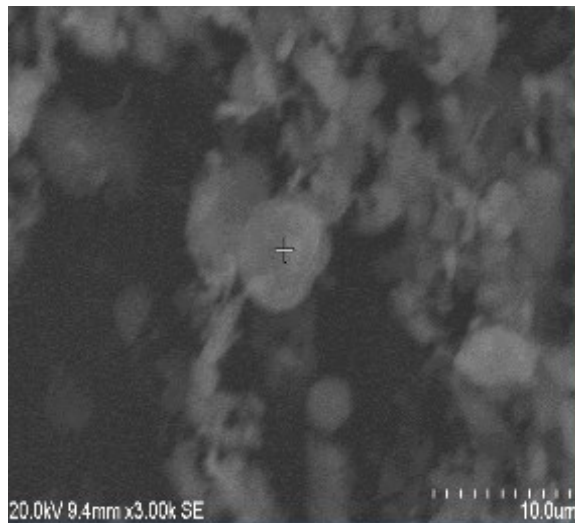


Figure 4.13 Photo des grains de MK par MEB

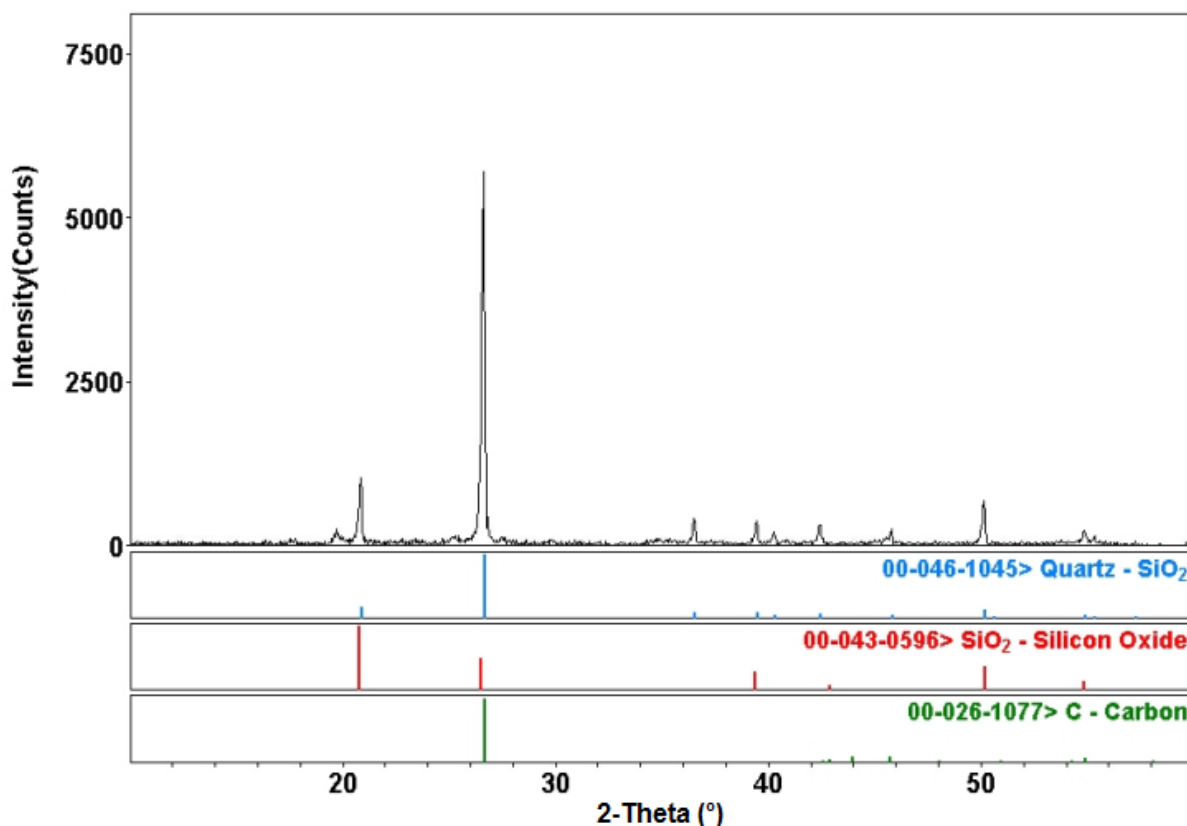


Figure 4.14 Spectre de DRX du MK

4.2.6 Fumée de silice

La fumée de silice (SF) utilisée est celle de la compagnie Silicium Bécancour. Les propriétés physiques ainsi que la composition chimique sont présentées dans les tableaux 4.1 et 4.2. Le diamètre moyen des particules est de 0,2 μm avec une surface spécifique de 18,2 m^2/g , déterminée par la méthode d'adsorption d'azote (BET). La figure 4.15 montre bien la forme sphérique des particules et le spectre de DRX de la FS présenté dans la figure 4.16 démontre son état bien vitrifié avec des traces de quartz et de carbone.

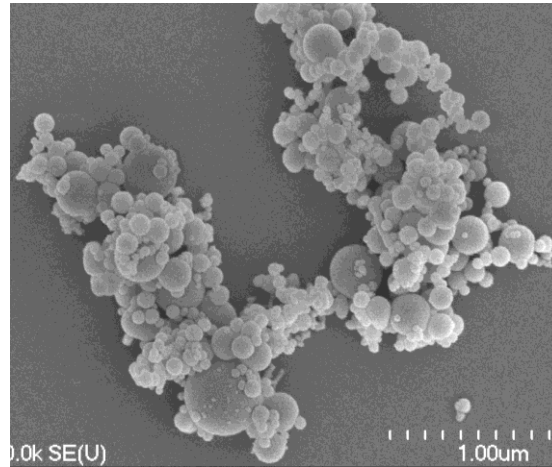


Figure 4.15 Photo des grains de FS par MEB

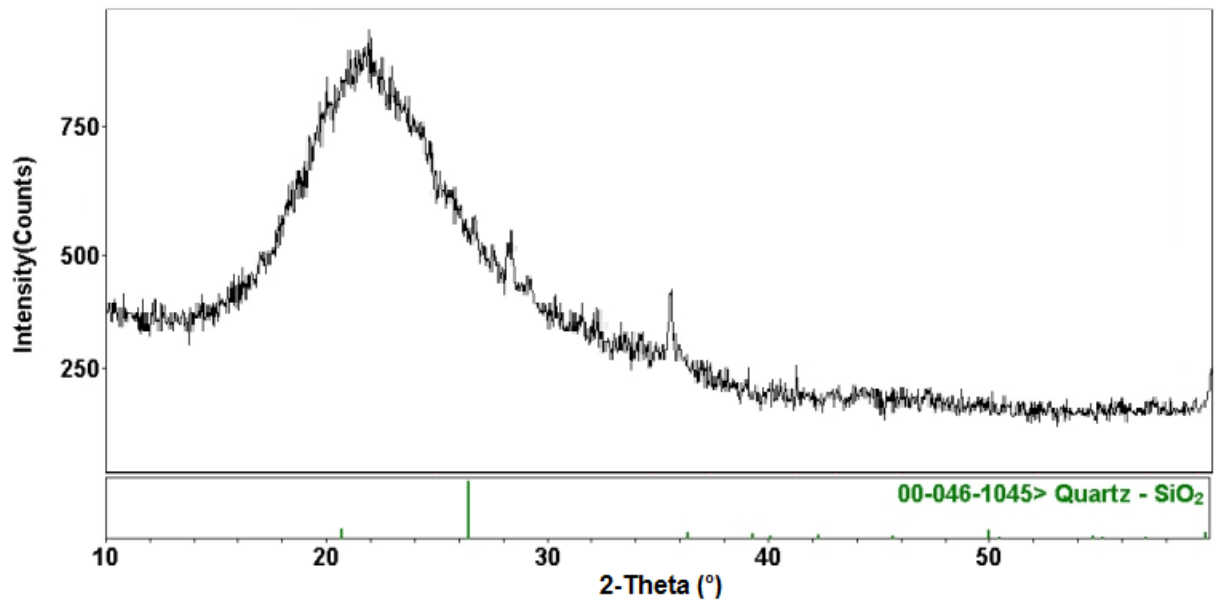


Figure 4.16 Spectre de DRX de la FS

4.2.7 Sable

Les propriétés du sable et des granulats utilisés dans la confection des bétons et des MBE sont très importantes puisque le calcul de la composition des MBE en dépend. Le sable utilisé dans cette étude est un sable naturel fournis par la compagnie DJL à Sherbrooke. La figure 4.17 présente une granulométrie typique du sable. Les granulométries ainsi que les propriétés physiques de tous les sables livrés et utilisés pendant les années de cette étude sont résumées

dans le tableau 4.4. Il est à noter que les sables utilisés pour la confection des MBE sont tous tamisés, sans exception, avec le tamis de 4,75 mm d'ouverture, pour des fins d'utilisation du viscosimètre ConTec 6.

Tableau 4.4 Granulométrie et propriétés physiques du sable

Sable Tamis	1	2	3	4	5	6	7
	Passant (%)						
10	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
5	99,0	96,3	99,3	99,4	98,9	99,0	99,4
2,5	86,0	81,4	84,0	87,0	86,8	87,8	85,0
1,25	71,0	69,5	67,9	73,3	70,2	73,0	67,5
0,63	54,4	56,2	50,6	56,4	48,9	52,8	47,2
0,315	29,6	29,4	25,5	30,1	23,5	25,9	24,0
0,16	9,2	9,3	7,1	8,9	7,4	8,0	8,3
0,08	3,0	3,0	2,9	2,9	3,0	3,2	3,2
Plat	0,02	0,02	0,04	0,01	0,38	0,04	0,00
Module de finesse	2,50	2,58	2,66	2,45	2,64	2,54	2,69
Densité	2,69	2,65	2,65	2,66	2,62	2,66	2,66
Adsorption (%)	1,06	1,16	1,18	0,97	1,66	1,01	0,99

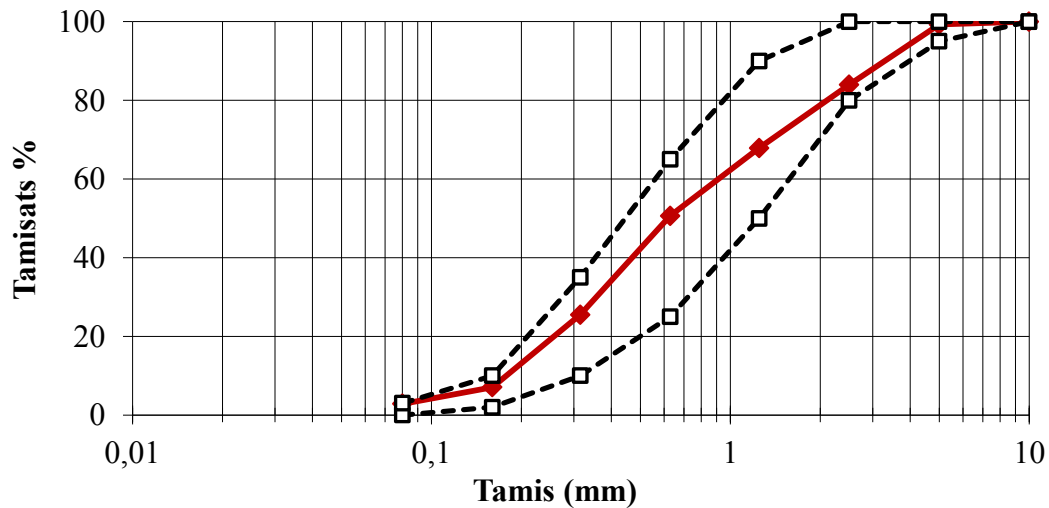


Figure 4.17 Courbe granulométrique typique du sable (fuseau normalisé CSA A23.1-2A)

4.2.8 Gros granulats

Les gros granulats utilisés pour la confection des bétons sont des granulats concassés fournis par la compagnie DJL à Sherbrooke. Les BAP et BSF sont confectionnés par des granulats

dont le diamètre nominal maximal est de 14 mm. Comme pour le sable, plusieurs livraisons de granulats 14 mm ont été faites durant les années de cette étude, les différentes granulométries utilisées sont résumées dans le tableau 4.5.

Tableau 4.5 Granulométrie et propriétés physiques des gros granulats

	Pierre 5 - 14			
	1	2	3	4
Densité	2,71	2,77	2,74	2,74
Adsorption (%)	0,46	0,48	0,55	0,63
Tamis	Passant (%)			
20	100,0	100,0	100,0	100,0
14	88,0	87,0	93,5	93,8
10	51,0	49,9	59,5	55,7
5	5,0	8,7	7,1	6,7
2,5	2,0	4,3	3,1	1,6
1,25	0,0	2,9	2,0	1,1
Plat	0,0	0,8	1,2	0,2

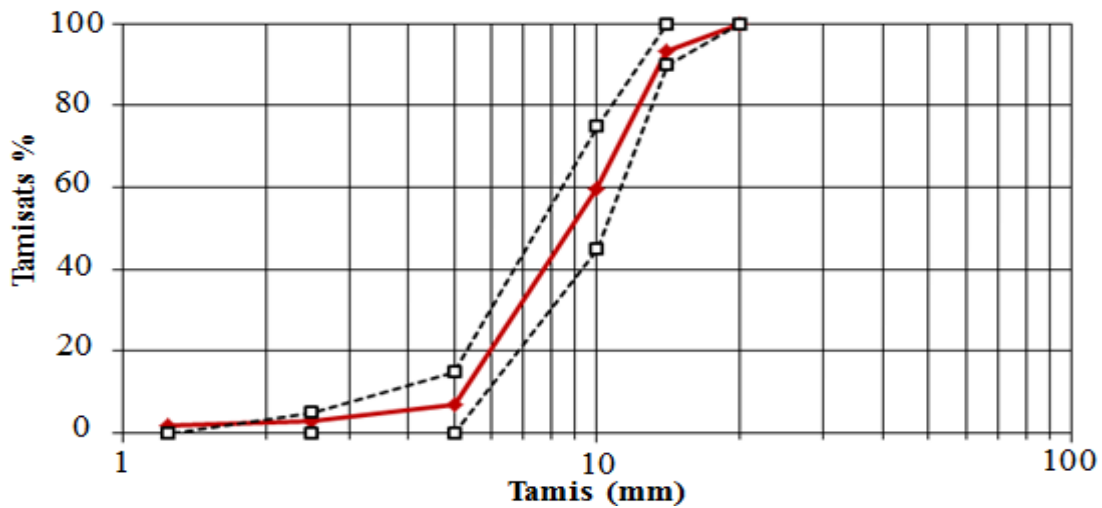


Figure 4.18 Courbe granulométrique typique de la pierre 5–14 mm
(fuseau normalisé CSA A23.1-2A)

4.2.9 Adjuvants chimiques

Pour obtenir la consistance visée pour chaque type de béton et des MBE correspondants et afin d'augmenter la stabilité des mélanges très fluides, plusieurs adjuvants chimiques sont proposés par nos partenaires industrielles, dont des SP et des AV.

Deux types de SP avec leurs AV compatibles sont sélectionnés pour l'étude menée sur les BAP. Les mêmes SP sont utilisés pour l'étude menée sur les BSF. Ces derniers sont des bétons à air entraîné où deux AEA compatibles à chaque SP sont sélectionnés pour la phase de validation.

Le premier SP est à base de polynaphtalène et le deuxième à base de polycarboxylate. Les propriétés physiques des différents adjuvants sélectionnés sont résumées dans le tableau 4.6.

Par ailleurs, il était nécessaire d'introduire un agent dés-entraîneur d'air dans tous les mélanges de mortiers afin d'éliminer l'influence de variation du pourcentage d'air sur les différentes propriétés étudiées.

Tableau 4.6 Propriétés des adjuvants

Adjuvant	Désignation	Densité (g/cm ³)	Extrait sec (%)
Superplastifiant	PNS	1,20	40,1
	PC	1,08	39,1
Agent de viscosité	AV1	1,21	43,0
	AV2	1,23	44,2
Agent entraîneur d'air	AEA1	1,01	10,1
	AEA2	1	8,3

4.3 COMPOSITION DES MÉLANGES DE RÉFÉRENCE

Comme il a été déjà mentionné au Chapitre 3, cette étude porte essentiellement sur des MBE, mais avant, la composition des bétons de référence doit être définie. Des bétons ayant deux différentes consistances pour deux différentes applications sont étudiés (figure 4.19) : les BAP (avec un étalement de 680 ± 20 mm) destinés à la construction des bâtiments et les BSF (avec un étalement de 550 ± 20 mm) destinés aux les infrastructures de transport. Ces derniers nécessitent une faible consolidation lors de leur mise en place alors que les BAP n'en ont pas besoin. Pour chaque type de béton, deux formules de référence sont proposées dont la

différence réside dans les adjuvants chimiques utilisés. Les exigences, la composition et les propriétés de chacun des bétons sont présentées dans les tableaux 4.7 et 4.8, respectivement.

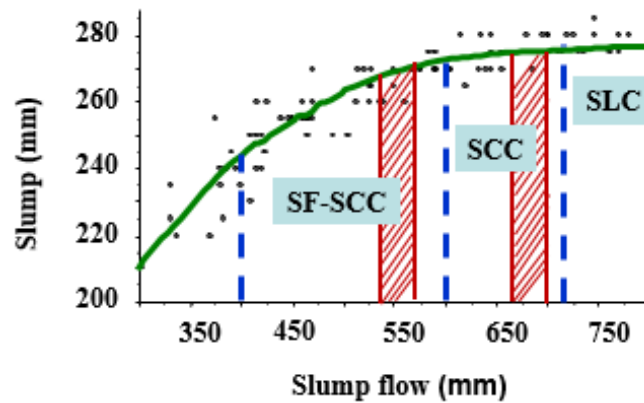


Figure 4.19 Définition des consistances étudiées dans le domaine des bétons fluides avec : SF-SCC (bétons semi-fluides), SCC (Bétons autoplaçants) et SLC (Bétons autonivelant) [Khayat, 2009]

Les BAP (eau/poudre, $E/P = 0,45$) sont proportionnés de façon à satisfaire aux critères de capacité de passage et de remplissage, de rétention avec le temps et de résistance à la ségrégation. Après plusieurs tentatives de recherche de deux combinaisons SP-AV compatibles et d'ajustement de la formulation du béton pour satisfaire aux exigences requises, deux combinaisons SP-AV sont retenues. De plus, une teneur en ciment relativement élevée, de 460 kg/m^3 , est utilisée pour assurer une bonne robustesse de ces mélanges. Le premier mélange de référence (BAP-REF1) contient un SP de type PNS utilisé avec son AV compatible (AV1) et le deuxième mélange (BAP-REF2) contient un SP type PC utilisé aussi avec son AV compatible (AV2).

D'autre part, les BSF ($E/P = 0,41$) sont des bétons à air entrainé, qui doivent aussi satisfaire à un certain nombre de critères de fluidité, stabilité, pourcentage d'air, résistance à la compression à 28 jours et de perméabilité aux ions chlorures. Les mêmes deux SP (PNS et PC) utilisés pour les BAP sont utilisés pour les BSF avec leurs AEA (AEA1 et AEA2) compatibles. Cependant, l'utilisation d'un AV ne s'avère pas nécessaire pour assurer une bonne stabilité de ces mélanges.

Tableau 4.7 Exigences des bétons de référence

	Exigences bétons autoplaçants	Exigences bétons semi-fluides
État frais	Béton sans air entrainé (2 à 3%) Étalement à 10 min: 680 ± 20 mm Étalement à 90 min ≥ 550 mm Différence étalement sans et avec J-Ring ≤ 25 mm Résistance à la ségrégation $< 15\%$	Pourcentage d'air entre 5 à 7% Étalement à 10 min: 550 ± 20 mm Résistance à la ségrégation $< 15\%$
État durci	Résistance à la compression à 28 j : 30 - 35 MPa	Résistance à la compression à 28 j: 45 ± 5 MPa Perméabilité aux ions chlorures à 28 j ≤ 1000 Coulomb

Tableau 4.8 Composition et propriétés des bétons de référence

	Bétons de référence			
	BAP (Bâtiments)		BSF (Infrastructures)	
	BAP-REF1	BAP-REF2	REF-BSF1	REF-BSF2
	PNS-AV1	PC-AV2	PNS-AEA1	PC-AEA2
<u>Composition du mélange</u>				
Ciment Type GU (kg/m ³)	460	460	400	400
Sable (kg/m ³)	743	743	875	875
Granulats 14 mm (kg/m ³)	922	922	875	875
E/C	0,45	0,45	0,41	0,41
SP (l/m ³)	5,50	2,20	4,30	1,56
AV (l/m ³)	2,50	0,92	-	-
AEA (ml/m ³)	-	-	57	23
<u>Propriétés du mélange</u>				
- Étalement à 10 min (mm)	690	680	550	560
- Capacité passage J-Ring (mm)	15	20	-	-
- Pourcentage d'air	1,8	1,7	5,5	6,1
- Résistance à la ségrégation (%)	8,6	5,6	1	1
- Étalement à 90 min (mm)	580	630	-	-
- Résistance à la compression à 28 j (MPa)	45	47	40	42
- Perméabilité aux ions chlorure à 28j (Coulomb)	-	-	1020	990

À partir des compositions mères, les MBE de référence sont conçus en remplaçant la surface spécifique des granulats par une surface spécifique équivalente de sable. Les dosages des deux SP et AV (en extrait sec/ciment) ainsi que la séquence de malaxage sont gardés les mêmes que ceux des bétons de référence. Toutefois, le volume total du MBE calculé devient inférieur à 1 m³ à cause de l'absence des granulats, une correction est faite afin d'exprimer la composition des MBE par m³. Il faut souligner que l'AEA n'est pas utilisé dans la formulation des MBE-SF à cause de l'effet de l'air sur les propriétés rhéologiques. D'ailleurs, un agent dés-entraîneur d'air est utilisé lors de la fabrication de tous les MBE sans exception pour éliminer l'effet de la variation du volume d'air d'un mélange à un autre sur les propriétés rhéologiques. Le tableau 4.9 résume la composition des MBE de référence ainsi que les différentes propriétés mesurées.

Tableau 4.9 Composition et propriétés des MBE de référence

Type de combinaison (ou SP)	MBE de référence			
	MBE-AP-REF		MBE-SF-REF	
	PNS-AV1	PC-AV2	PNS	PC
<u>Composition du mélange</u>				
Ciment Type GU (kg/m ³)	689	693	622	617
Sable (kg/m ³)	1159	1172	1392	1406
E/C	0,45	0,45	0,41	0,41
SP (l/m ³)	9,8	2,9	6,7	2,4
AV (l/m ³)	4,8	1,4	-	-
<u>Propriétés du mélange</u>				
Étalement à 10 min (mm)*	264	240	210	210
Temps à travers V-funnel (sec)**	2,95	2,1	4,48	5,4
Seuil de cisaillement (Pa)	13,5	16	25	29
Viscosité plastique (Pa.s)	3,55	2,60	7,6	7,5
Étalement à 60 min (mm)	248	228	122	155
Résistance à 28j (MPa)	49	67	59	59

* Étalement au mini cône (70×100×60) mm; ** Mini V-funnel (30×30×300) mm

Afin de comparer l'étalement des MBE et ceux des bétons correspondants avec les résultats trouvés par Erdem et coll. [2009], tous les résultats sont portés sur le même graphique de la figure 4.20. Il est clair que les étalements des mélanges de référence de cette recherche concordent très bien avec les autres résultats.

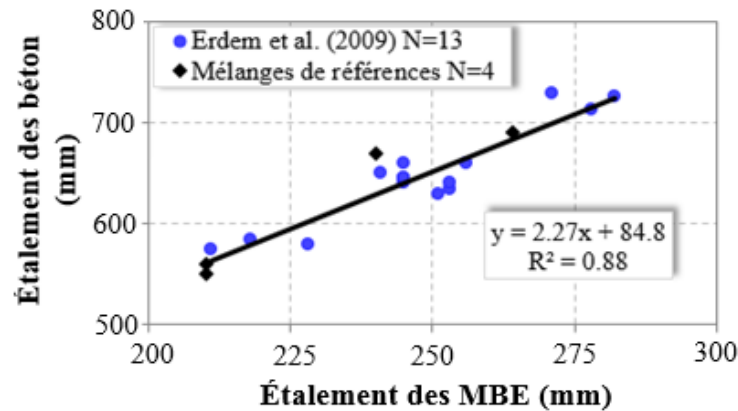


Figure 4.20 Étalement des MBE vs. celui des bétons correspondants

4.4 COMPATIBILITÉ ET ROBUSTESSE DES BAP DE RÉFÉRENCE

Généralement dans la littérature lorsqu'il est question de compatibilité, il s'agit souvent du couple ciment-SP, alors que le trio ciment-SP-AV est rarement évoqué. La présence d'un AV permet sans doute de stabiliser les BAP, mais pour cela il faut d'abord trouver la bonne combinaison SP-AV avec les dosages adéquats. En effet, la conception des mélanges de référence de cette étude avec l'optimisation des combinaisons SP-AV a pris un temps non négligeable durant lequel de nombreux problèmes ont apparus, dû à la grande sensibilité des BAP. Les BAP doivent répondre à plusieurs critères simultanément : grande fluidité initiale, bonne capacité de passage, bonne résistance à la ségrégation. De plus, d'autres critères peuvent s'ajouter, selon les besoins de chaque application, comme faible viscosité ou bonne rétention de fluidité avec le temps, etc. La rétention de fluidité n'est pas juste liée au temps de transport, mais peut être une indication d'un surdosage en AV ou d'une incompatibilité du trio ciment-SP-AV s'il y a une chute brusque dans la fluidité. De plus, une ségrégation, un surdosage en SP ou encore un excès d'entraînement d'air sont d'autres signes du phénomène d'incompatibilité du trio ciment-SP-AV. Lors de l'optimisation des BAP de référence, il fallait faire face à tous ces problèmes et essayer de trouver à chaque fois la solution adéquate. Les tableaux 4.10 et 4.11 résument les différentes tentatives effectuées pour l'optimisation et la sélection des BAP de référence en présence de PNS et PC, respectivement.

Le tableau 4.10 justifie bien la composition du mélange BAP-REF1, en présence de SP à base de PNS, surtout concernant la teneur relativement élevée en ciment (460 kg/m^3), où il était

impossible de satisfaire aux différents critères des BAP avec une teneur de 425 kg/m³ de ciment. Pour le mélange BAP-REF2, la teneur en ciment est gardée la même que celle de BAP-REF1 dans la certitude de faciliter la tâche et aboutir rapidement à la meilleure combinaison PC-AV. Hélas, les tentatives réalisées en présence du SP-PC sont deux fois plus importantes que celles réalisées en présence de SP-PNS, ce qui est dû à la grande sensibilité des BAP en présence de PC. Plusieurs éventualités sont prises en considération comme changer le type d'AV, changer le PC, diminuer le rapport E/P, augmenter le rapport GG/S et même introduire 5% de filler calcaire (CC3) en substitution massique. Peu d'améliorations sont notées jusqu'à l'obtention de la combinaison optimale PC-AV2 (tableau 4.11).

Par ailleurs, lors de cette étape d'optimisation, il a été noté que pour les mélanges où le dosage en SP est ajusté au fur et à mesure pour obtenir la consistance souhaitée, les pourcentages de ségrégation sont plus importants (mélanges : 27, 29 et 31) que des mélanges où la quantité nécessaire de SP est ajoutée totalement au début (mélanges : 28, 30 et 32). De ce fait et dans le but de diminuer au maximum les variabilités qui peuvent être obtenus dans les résultats, la quantité nécessaire de SP est introduite initialement pour tous les mélanges de béton ou de mortier, sans aucun ajustement. Si la fluidité n'est pas satisfaisante, le mélange est jeté et répété autant de fois que c'est nécessaire pour avoir la fluidité initiale souhaitée. Les mélanges 11 et 30 sont retenus comme des mélanges références.

Le passage vers les MBE est effectué comme déjà expliqué au § 4.2. Les étalements obtenus pour les deux MBE de référence sont un peu différents (265 mm en présence de PNS-AV1 et 240 mm en présence de PC-AV2), mais les seuils de cisaillement sont proches et les consistances reflètent bien le domaine autoplaçant. Par la suite, aucun changement n'a été porté dans la composition des deux MBE de référence.

Pour s'assurer de la stabilité des MBE-AP de référence, un essai de conductivité est réalisé pour ces deux MBE. La conductivité est mesurée sur la colonne décrite au §3.3.2.8. Les figures 4.21-a et 4.21-b illustrent la conductivité électrique des MBE de référence en présence de PNS-AV1 et PC-AV2, respectivement. Le changement dans la conductivité résulte principalement de la dissolution des composants de ciment dans la solution interstitielle. Pour le mélange de référence en présence de PNS-AV1, aucun changement de conductivité n'est

observé entre le haut et le bas de la colonne. De plus, aucun ressuage n'est noté à la fin de l'essai. Par ailleurs, pour le mélange de référence en présence de PC-AV2, une légère différence de conductivité est notée entre la paire d'électrodes de haut et celle du bas. Ceci indique une augmentation de la proportion d'eau à ce niveau. En effet, une petite quantité d'eau de ressuage de trois grammes est récupérée à la fin des mesures.

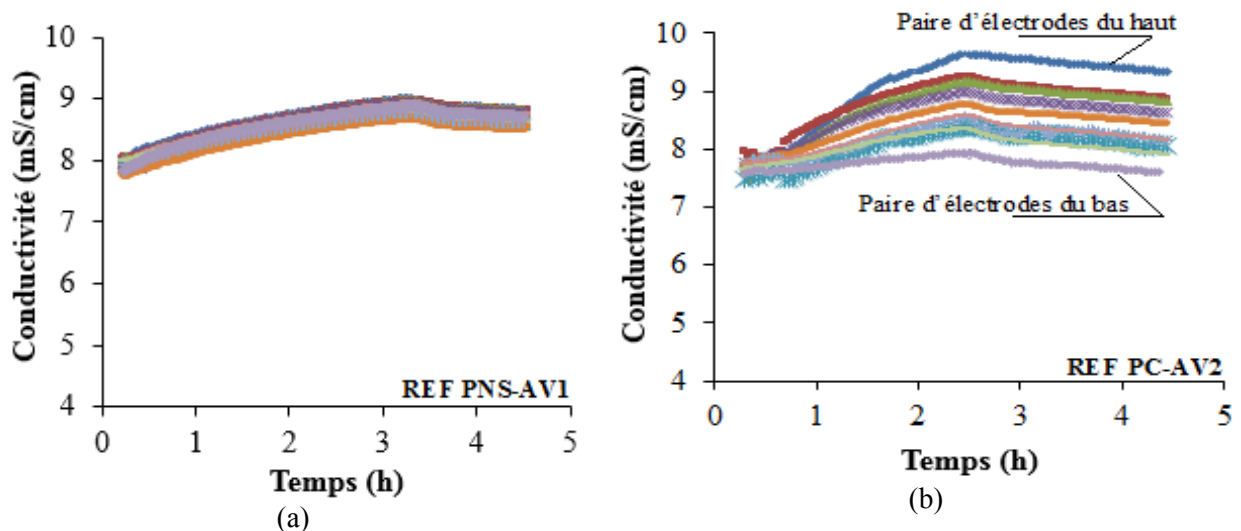


Figure 4.21 Conductivité électrique en fonction du temps pour MBE de référence en présence de (a) PNS-AV1 ; (b) PC-AV2

Pour avoir une idée plus claire sur les changements dans la quantité d'eau au niveau de chaque électrode, un indice de stabilité est calculé. Il s'agit du pourcentage de la variation de la conductivité électrique entre les 10 paires d'électrodes à un temps donné. La figure 4.22 présente l'indice de stabilité pour les deux MBE de référence. Il est à noter que le MBE de référence en présence de PNS-AV1 présente un meilleur indice de stabilité en comparaison à celui du MBE de référence en présence de PC-AV2, mais ce dernier est acceptable du moment que son indice demeure au-dessus de 96%.

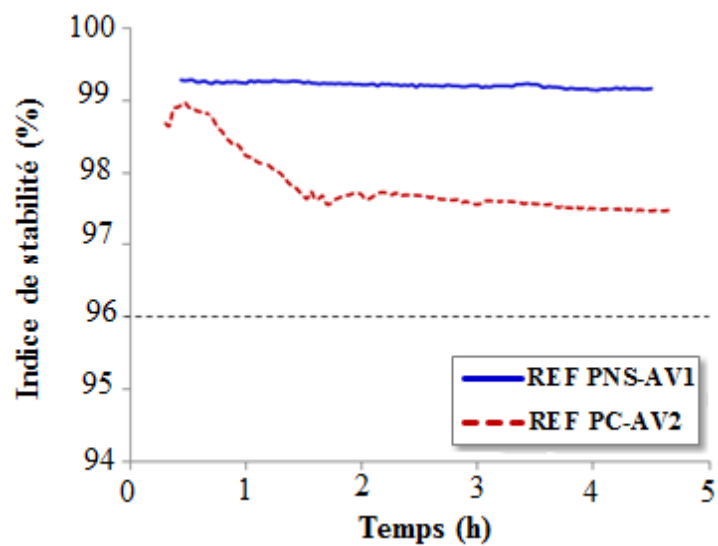


Figure 4.22 Conductivité électrique des MBE de référence

Tableau 4.10 Optimisation de la formulation du mélange de référence avec SP à base de PNS (BAP-REF1)

Mélange	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Ciment GU (kg/m ³)	425	425	425	425	425	425	425	425	425	425	460
E/P (kg/m ³)	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45
GG/S	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,5	0,45	0,50	0,45	0,45
SP (% massique /ciment)	0,5 (PNS)	0,6 (PNS)	0,57 (PNS)	0,66 (PNS)	0,66 (PNS)	0,83 (PNS)	0,80 (PNS)	0,80 (PNS2)	1,04 (PNS2)	0,7 (PNS2)	0,65 (PNS)
AV (% massique /ciment)	-	0,125 (AV1)	0,22 (AV1)	0,25 (AV 1)	0,25 (AV 1)	0,25 (AV 1)	0,25 (AV 1)	0,125 (AV1)	0,125 (AV1)	0,18 (AV1)	0,25 (AV1)
Réducteur d'eau (ml/100 kg ciment)	-	-	-	-	-	100	-	-	-	-	-
Étalement initial (mm)	675	675	690	690	690	690	680	665	660	665	690
Étalement à 90 min (mm)	430 (30 min)	470 (30 min)	-	460	480	-	580	-	-	540 (60 min)	630
Δd (mm) ⁽¹⁾	40	35	35	20	20	20	20	55	60	60	15
J-Ring : Δh (mm)	20	20	20	15	15	20	12	25	25	25	10
Air (%)	2	2	2,5	2,9	4	5,3	4,7	1,8	2	1,8	
S (%) ⁽²⁾	-	25	18	13,5	14,5	17	16	-	-	-	8,6
C.O.V (%) ⁽²⁾	-	-	-	5,3	5,2	-	-	-	-	-	2,3

N.B : Pour les deux tableaux 4.10 et 4.11 :

- : Non disponible

⁽¹⁾ : Différence de diamètre entre les essais de l'étalement et J-ring

⁽²⁾ : Le pourcentage de la ségrégation est mesuré avec l'essai de la colonne de ségrégation, ce pourcentage est calculé entre la section du haut et celle du bas. Si ce pourcentage est jugé acceptable ou un peu limite ($\leq 15\%$), le C.O.V est calculé par la suite entre les quatre sections. Dans le cas où S (%) est jugé trop élevé, le C.O.V n'est pas calculé.

⁽³⁾ : SP ajusté au fur et à mesure pour atteindre l'étalement de 680 ± 20 mm.

⁽⁴⁾ : La quantité totale de SP pour atteindre l'étalement de 680 ± 20 mm est ajoutée initialement (sans ajustement).

Tableau 4.11 Optimisation de la formulation du mélange de référence avec SP à base de PC (BAP-REF2)

Mélange	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
Ciment GU (kg/m ³)	460	460	460	460	460	460	460	460	460	460	460
E/P (kg/m ³)	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,42
GG/S	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,50	0,45
SP (% massique/ciment)	0,427 (PC2)	0,535 (PC2)	0,032 (PC2)	0,43 (PC2)	0,48 (PC2)	0,23 (PC2)	0,28 (PC3)	0,25 (PC3)	0,35 (PC3)	0,27 (PC3)	0,30 (PC3)
AV (% massique/ciment)	0,018 DG80	0,028 DG80	0,009 DG200	0,0178 DG200	0,217 DG200	0,01 DG80	0,02 DG80	0,08 AV1	0,11 AV1	0,08 AV1	0,08 AV1
Étalement initial (mm)	660	660	690	680	670	660	700	680	670	700	660
Étalement à 90 min (mm)	-	-	-	-	500	-	-	-	-	-	540
Δd (mm) ⁽¹⁾	20	20	-	-	20	-	-	0	40	15	20
J-Ring : Δh (mm)	15	15	-	-	15	-	-	15	20	15	15
Air (%)	1,1	1,2	2	1,1	1,5	4	6	0,9	2,1	0,9	1,4
S (%) ⁽²⁾	18	16	20	17	13	-	-	19	26	19	14
C.O.V (%) ⁽²⁾	-	-	-	-	4,5	-	-	-	-	-	2,9

Mélange	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32
Ciment GU (kg/m ³)	460	460	460	460	460	460	460	460	460	460
E/P (Kg/m ³)	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45
GG/S	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45
SP (% massique/ciment)	0,13 (PC)	0,13 (PC)	0,15 (PC)	0,15 (PC)	0,17 ⁽³⁾ (PC)	0,15 ⁽⁴⁾ (PC)	0,22 ⁽³⁾ (PC)	0,20⁽⁴⁾ (PC)	0,27 ⁽³⁾ (PC)	0,26 ⁽⁴⁾ (PC)
AV (% massique/ciment)	0,0135 DG80	0,0225 DG80	0,0135 DG200	0,0315 DG200	0,043 (AV2)	0,043 (AV2)	0,086 (AV2)	0,086 (AV2)	0,129 (AV2)	0,129 (AV2)
Étalement initial (mm)	700	660	660	660	660	660	660	680	660	665
Étalement à 90 min (mm)	-	-	-	500	470	430	520	610	590	470
Δd (mm) ⁽¹⁾	30	40	40	25	45	60	50	20	30	55
J-Ring : Δh (mm)	30	25	20	20	35	40	30	10	25	30
Air (%)	0,8	1,1	1	1,5	1,5	1,2	1,5	1,4	1,9	1,2
S (%) ⁽²⁾	26	20	36	10	14	9	9,5	5,6	12	7,5
C.O.V (%) ⁽²⁾	-	-	-	2,2	2,7	2,5	2,5	3,1	2,6	2,9

4.5 DISPOSITIONS ET MESURES ENTREPRISES

Des mesures particulières sont prises afin de maintenir une meilleure reproductibilité des résultats surtout à l'échelle des MBE :

- Afin d'éliminer le risque de pré-hydratation des ciments lors du stockage, le partenaire industriel a accepté de livrer le ciment dans des gros sacs d'une tonne au lieu des sacs de 40 kg. Par la suite, nous avons la tâche de mettre la quantité nécessaire pour une phase complète dans des petits sacs doublé et hermétiquement fermée, le tout dans des barils. Ces barils sont conservés dans une salle à température et humidité contrôlées. De cette façon, le ciment a gardé les mêmes propriétés pour une longue période (18 mois sans aucun problème).
- Tous les matériaux cimentaires sont stockés dans des barils dans une salle à température et humidité contrôlées.
- Des quantités de sable suffisantes pour l'étude des MBE sont conservées dans des barils couverts et stockés dans le laboratoire.
- Le sable est tamisé sur un tamis de 4,75 mm avant son utilisation dans le mortier et son humidité est toujours contrôlée de façon à avoir la même humidité lors de la fabrication des MBE. Si le sable est sec (cas du haut du baril), il faut l'humecter de la quantité juste nécessaire et évidemment bien le mélanger pour l'homogénéiser. Et si le sable est humide (souvent le cas du bas de baril), il faut le sécher.
- Des essais de densité et pourcentage d'extrait sec des adjuvants sont faits périodiquement et à chaque réception d'une nouvelle livraison.
- Toujours dans le but d'éliminer les variations, la quantité nécessaire de SP est toujours ajoutée initialement. Si la fluidité n'est pas bonne le mélange est jeté, un autre mélange doit être préparé à nouveau jusqu'à avoir le dosage en SP nécessaire introduit initialement.

CHAPITRE 5 : EFFET DES CIMENTS BINAIRES SUR LES PROPRIÉTÉS DES MBE

5.1 INTRODUCTION

Dans ce chapitre il s'agit d'étudier l'effet des AM et des fillers, en combinaisons binaires, sur les propriétés rhéologiques, la cinétique d'hydratation et les résistances à la compression des mortiers des bétons équivalents (MBE). Il faut rappeler que, deux types de MBE sont visés dans cette étude. Les mortiers de bétons équivalents autoplacants (MBE-AP), dont les bétons correspondants sont destinés à la construction de bâtiments et les mortiers de bétons équivalents semi-fluides (MBE-SF) dont les bétons correspondants sont destinés à la construction des infrastructures de transport.

Les résultats de ce chapitre mettront la lumière sur les bénéfices et les limites de la combinaison AM (ou fillers) – adjuvants chimiques servant ainsi comme base de données pour l'étape suivante qui est la sélection de systèmes ternaires à étudier pour chaque application. Ces derniers seront utilisés dans la conception des BFRA.

Le manque de certaines interprétations dans ce chapitre sera élucidé plus spécifiquement dans le chapitre suivant (chapitre 6) où l'objet sera de relier les résultats trouvés ci-dessous aux différentes propriétés physico-chimiques des AM et leurs interactions avec les adjuvants.

5.2 EFFET DES AM ET DE LA COMBINAISON SP-AV SUR LES PROPRIÉTÉS DES MBE-AP

Dans cette section, l'étude s'est portée sur les MBE-AP. Deux MBE-AP de référence sont conçus à partir des BAP, dont le rapport E/P (eau/poudre) est de 0,45 et deux types de combinaisons SP-AV (PNS-AV1 et PC-AV2) sont utilisés. Afin d'avoir que l'effet des AM, les dosages de SP et AV sont gardés constants pour tous les mélanges des systèmes binaires. Ces derniers sont préparés avec six différents AM et deux fillers calcaires, introduits à tour de

rôle, en substitution massive du ciment. De ce fait, les formulations de tous les MBE-AP (PNS-AV1 et PC-AV2) sont les mêmes que celles des MBE-AP de référence représentée sur le tableau 4.9 où la différence réside juste dans le remplacement massif du ciment par les différents pourcentages en AM.

Les différents taux de remplacement utilisés sont : 10% à 40% pour les deux types de cendres volantes (CV-F et CV-C), 10% à 50% pour les deux laitiers (L100 et L120), 2% à 7% pour le métakaolin (MK) et la fumée de silice (FS) et 10% à 40% pour les deux fillers calcaires (CC35 et CC3). Les deux laitiers ainsi que les deux fillers calcaires se différencient par leurs finesses dont les plus fins sont L120 et CC3 (plus de détails se trouvent dans le chapitre 3).

Pour chaque MBE les propriétés rhéologiques sont mesurées à 10, 30 et 60 min, le dégagement de chaleur est suivi jusqu'à 48 heures d'hydratation et les résistances à la compression sont déterminées à 1, 28 et 91 jours.

5.2.1 Effet des AM et de la combinaison SP-AV sur les propriétés rhéologiques et la stabilité des MBE-AP

5.2.1.1 Effet sur la fluidité

La fluidité des MBE-AP contenant des dosages variables en AM et en fillers est évaluée en déterminant l'étalement au mini cône et le seuil de cisaillement en utilisant le viscosimètre à cylindres coaxiaux ConT ec 6. Selon la combinaison SP-AV, le diamètre moyen de l'étalement et le seuil de cisaillement des MBE-AP binaires sont présentés dans les figures 5.1 à 5.4. Les résultats de l'étalement concordent avec les résultats du seuil de cisaillement : un faible seuil de cisaillement correspond bien à un grand étalement au mini-cône. De ce fait, et pour ne pas alourdir le texte, la discussion des résultats est basée principalement sur les variations du seuil de cisaillement.

En général, le remplacement partiel du ciment par la FS (de 2% à 7%) ou le MK (de 2% à 7%) augmente le seuil de cisaillement des MBE-AP, suite à l'augmentation de la surface spécifique

de la matrice cimentaire. Cependant, un effet bénéfique du remplissage des vides inter-particulaires peut prendre le dessus sur l'effet de l'augmentation de la surface spécifique, menant ainsi à une amélioration de la fluidité. Effectivement, une diminution allant jusqu'à 15% du seuil de cisaillement est observée en présence de la combinaison PNS-AV1, lorsque la FS et le MK sont introduits à des faibles taux de remplacement (2% FS et 4% MK). Cependant, ceci n'est observé en présence de la combinaison PC-AV2 car ces MBE ont présentés des seuils de cisaillement deux fois plus importants que ceux obtenus en présence de la combinaison PNS- AV1.

Kwan et coll. [2012] ont trouvé qu'en présence d'un SP à base de PC, l'effet de la FS sur la fluidité dépend essentiellement du dosage en SP, de sorte que la fluidité peut être améliorée quand le dosage en PC est élevé. Ce qui explique la différence des résultats obtenus avec les deux types de combinaisons SP-AV.

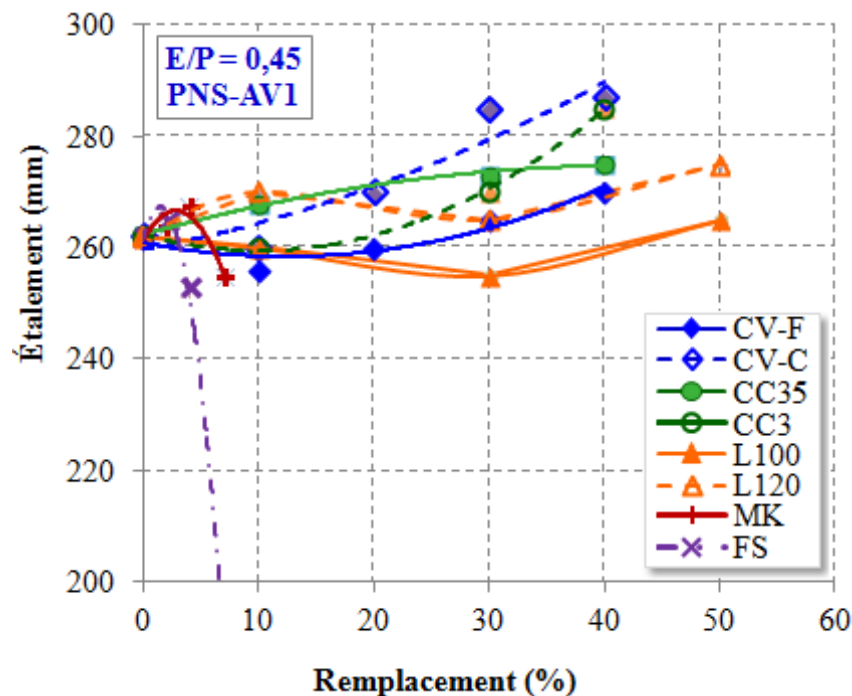


Figure 5.1 Étalement à 10 min des MBE-AP avec différents pourcentage d'AM en présence de PNS-AV1 (SP-AV fixes)

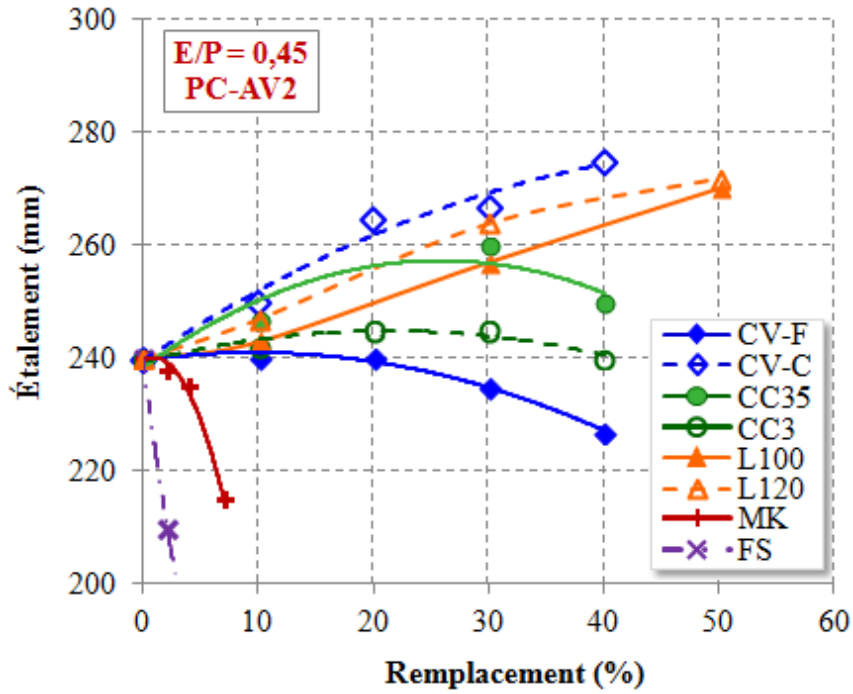


Figure 5.2 Étalement à 10 min des MBE-AP avec différents pourcentages d'AM en présence de PC-AV2 (SP-AV fixes)

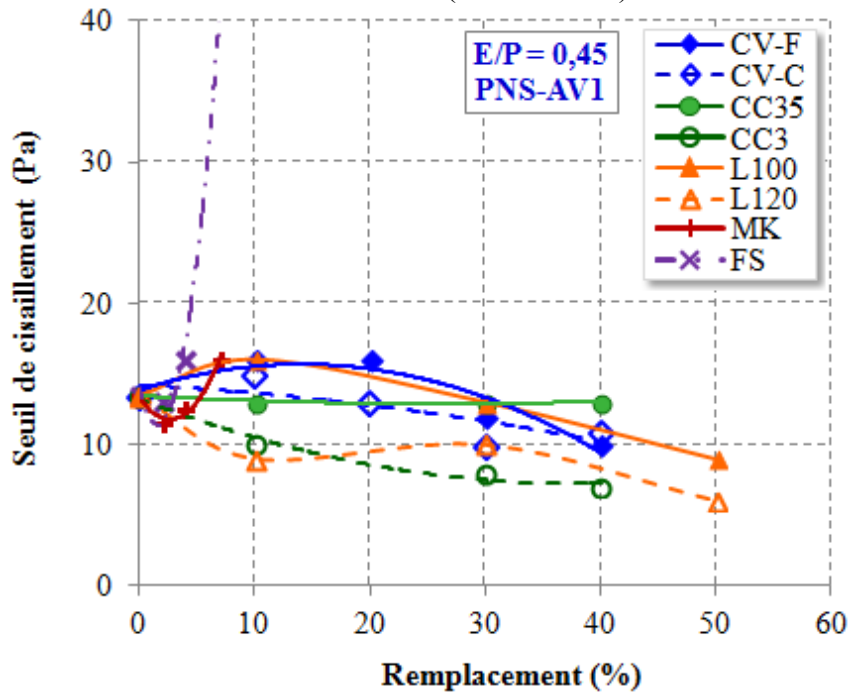


Figure 5.3 Seuil de cisaillement à 10 min des MBE-AP avec différents pourcentages d'AM en présence de PNS-AV1 (SP-AV fixes)

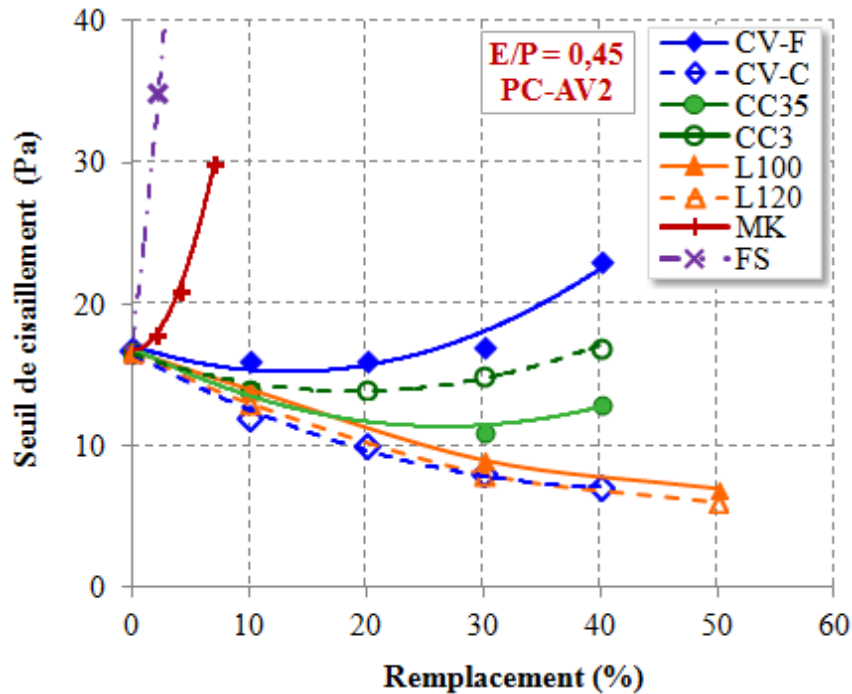


Figure 5.4 Seuil de cisaillement des MBE-AP avec différents pourcentages d'AM en présence de PC-AV2 (SP-AV fixes)

Le remplacement d'une partie du ciment par les carbonates de calcium (de 10% à 40%), en présence de la combinaison PC-AV2, tend à diminuer le seuil de cisaillement des MBE-AP. En effet, une diminution de 35%, par rapport au MBE-AP de référence, est constatée avec 30% de CC35 (figure 5.4). Avec le CC3, la diminution du seuil de cisaillement est moins importante et une légère augmentation est constatée pour des taux de remplacement élevé (30% à 40%). Les deux finesses des carbonates de calcium ont contribué au remplissage des vides entre les particules solides et à améliorer la distribution granulométrique, offrant ainsi de meilleures propriétés d'écoulement. Cependant, à des taux de remplacement élevés de CC3 (carbonates de calcium finesse élevée) la surface spécifique augmente ce qui se traduit par une légère augmentation dans le seuil de cisaillement.

Lorsque la combinaison PNS-AV1 est utilisée, l'augmentation du pourcentage de remplacement de CC35 n'affecte pas le seuil de cisaillement, tandis que le CC3 diminue considérablement le seuil de cisaillement. Cette différence pourrait être attribuée à la faible capacité des PNS à

dispenser les particules de calcaire, en comparaison à celle des PC, due à la neutralisation partielle de la charge des PNS en présence des ions Ca^{2+} à un pH élevé [Mikanovic et Jolicoeur, 2008].

La substitution d'une partie de ciment par des AM ayant une finesse similaire ou un peu plus élevée que le ciment GU, comme le L100, L120 et la CV-C, montre une réduction du seuil de cisaillement des MBE-AP avec l'augmentation du taux de remplacement. La diminution du seuil de cisaillement semble plus importante dans les MBE-AP en présence de la combinaison PC-AV2 que ceux en présence de la combinaison PNS-AV1. L'écart entre les deux combinaisons peut atteindre jusqu'à 40%. En effet, le remplacement du ciment par 50% de L100, 50% de L120 ou 40% de CV-C conduit à une diminution du seuil de cisaillement de l'ordre de 58%, 64 % et 58%, respectivement, en présence de la combinaison PC-AV2. Alors que cette diminution est de 33%, 55% et 18% en présence de la combinaison PNS-AV1. Encore une fois, cela est due du fait que le PC sélectionné est plus puissant à disperser ce genre de poudre que le PNS.

Bien que les particules de la CV-F soient légèrement plus grossières que les particules de la CV-C et du ciment GU, le remplacement du ciment par la CV-F résulte en une augmentation dans le seuil de cisaillement en présence de la combinaison PC-AV2. En effet, jusqu'à 20% de remplacement, le seuil de cisaillement n'est pas affecté significativement. Au-delà de 20% de remplacement, une diminution allant jusqu'à 26% est notée lorsque la combinaison PNS-AV1 est utilisée, alors qu'une augmentation de l'ordre de 38% est notée lorsque la combinaison PC-AV2 est utilisée. Il a été reporté qu'à un taux de remplacement élevé du ciment par la CV-F, la teneur en carbone imbrûlé provenant de la cendre volante augmente conduisant à une diminution dans la fluidité à cause de l'adsorption du SP [Park, 2005; Aydin Akgerman, 1996]. Dans cette étude, le PC semble s'adsorber activement en présence du carbone imbrûlé que le PNS [Mikanovic et coll., 2010].

5.2.1.2 Effet sur la viscosité plastique et le temps d'écoulement par l'entonnoir en V

La résistance à l'écoulement des MBE-AP contenant les différents dosages en AM et en fillers est évaluée en déterminant le temps d'écoulement à travers l'entonnoir en V et la viscosité plastique avec le viscosimètre à cylindres coaxiaux ConTec 6. Dépendamment de la combinaison SP-AV utilisé, le temps d'écoulement à travers l'entonnoir en V et la viscosité plastique (μ_{pl}) des MBE-AP binaires sont présentés dans les figures 5.5 à 5.8. À la fin de ce chapitre, une relation linéaire a été trouvée entre le temps d'écoulement à travers l'entonnoir en V et μ_{pl} des MBE (figure 5.75), pour cette raison et afin d'alléger le texte, la discussion des résultats est portée principalement sur les variations dans la viscosité plastique des MBE-AP.

Il apparaît clairement que les mélanges en présence de la combinaison PNS-AV1 sont plus visqueux en comparaison à ceux en présence de la combinaison PC-AV2. Ceci est aussi vrai pour les MBE-AP de référence, où la viscosité plastique avec PNS-AV1 est 25% plus importante qu'en présence de PC-AV2. Dans le même cadre de cette étude, il a été noté qu'en absence d'un agent de viscosité et pour une consistance semi-fluide, les mélanges de référence ont présenté des μ_{pl} très semblables avec les deux types de SP utilisés (PNS et PC) (§5.2.2). Par ailleurs, l'étude entreprise par Pan [2011] a montré que, pour n'importe quel consistance, les MBE contenant du PNS ont des μ_{pl} plus faibles que ceux en présence de PC. Cette différence peut être liée qu'en présence d'un AV, la demande en PC est un peu plus importante pour diminuer τ_0 ce qui diminue en même temps μ_{pl} .

L'effet de l'utilisation d'un AV sur le seuil de cisaillement et μ_{pl} dépend fortement de la nature de la combinaison SP-AV. D'une part, généralement plus les AV ont des masses moléculaires importantes plus ont tendance à augmenter la viscosité plastique et à retenir l'eau [Sonebi, 2006]. D'autre part, une grande rétention d'eau peut augmenter davantage la quantité de SP nécessaire pour une consistance donnée. Les SP à base de PC par leur répulsion stérique et électrostatique offrent une meilleure dispersion des particules ce qui peut conduire à une diminution de la viscosité. L'important c'est que μ_{pl} soit adéquate pour contrôler la

ségrégation statique et dynamique. Toutefois, des faibles μ_{pl} peuvent convenir à des applications où des mélanges beaucoup moins collants sont souhaités.

Bien qu'il soit largement accepté dans la littérature, que les paramètres qui influencent le seuil de cisaillement affectent également μ_{pl} . De manière générale, les particules fines et sphériques des AM sont fines et sphériques semblent diminuer μ_{pl} des mélanges. En outre, l'augmentation du taux de remplacement du ciment par des particules hautement sphériques de la CV-C et les particules semi-arrondis de CC3 a entraîné une réduction de la viscosité plastique. Cette diminution est plus importante pour les MBE en présence de la combinaison PC-AV2. En effet, le remplacement de 40% de ciment par la CV-C, CC35 ou CC3 a entraîné une diminution de l'ordre de 38% et 24% de la viscosité plastique, en présence de la combinaison PC-AV2 et PNS-AV1, respectivement.

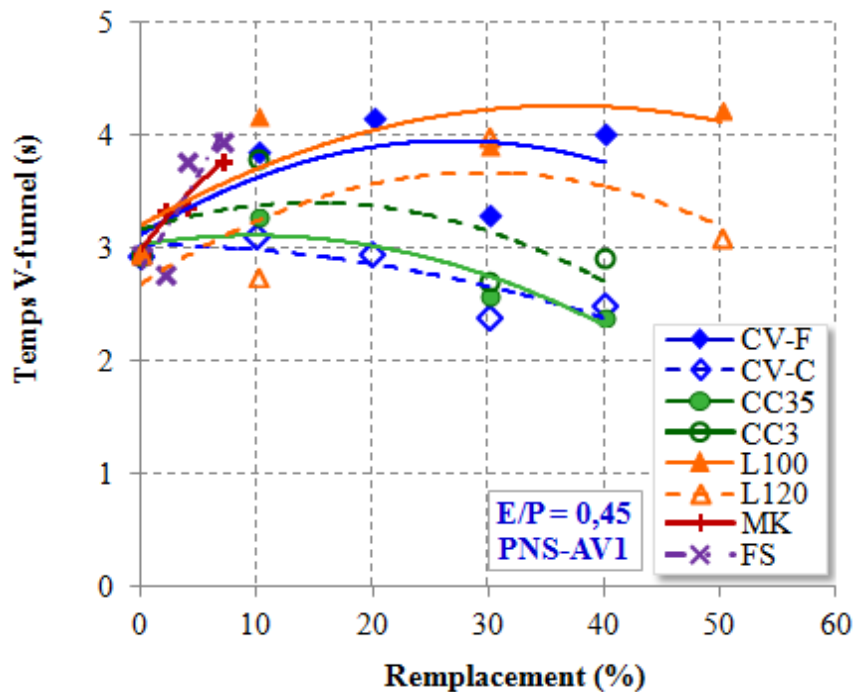


Figure 5.5 Temps d'écoulement à travers V-funnel à 10 min des MBE-AP avec différents pourcentages d'AM en présence de PNS-AV1 (SP-AV fixes)

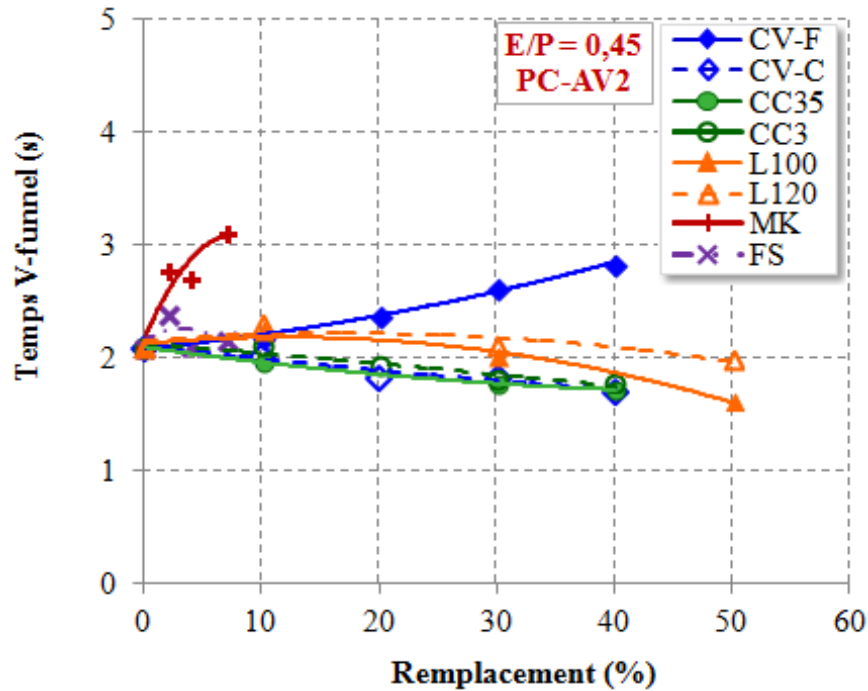


Figure 5.6 Temps d'écoulement à travers V-funnel à 10 min des MBE-AP avec différents pourcentages d'AM en présence de PC-AV2 (SP-AV fixes)

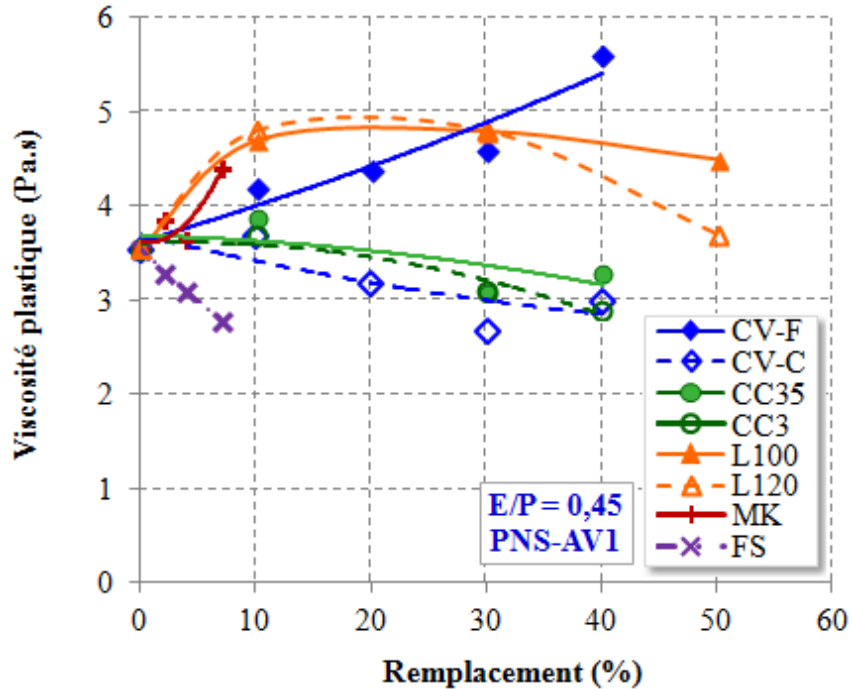


Figure 5.7 Viscosité plastique à 10 min des MBE-AP avec différents pourcentages d'AM en présence de PNS-AV1 (SP-AV fixes)

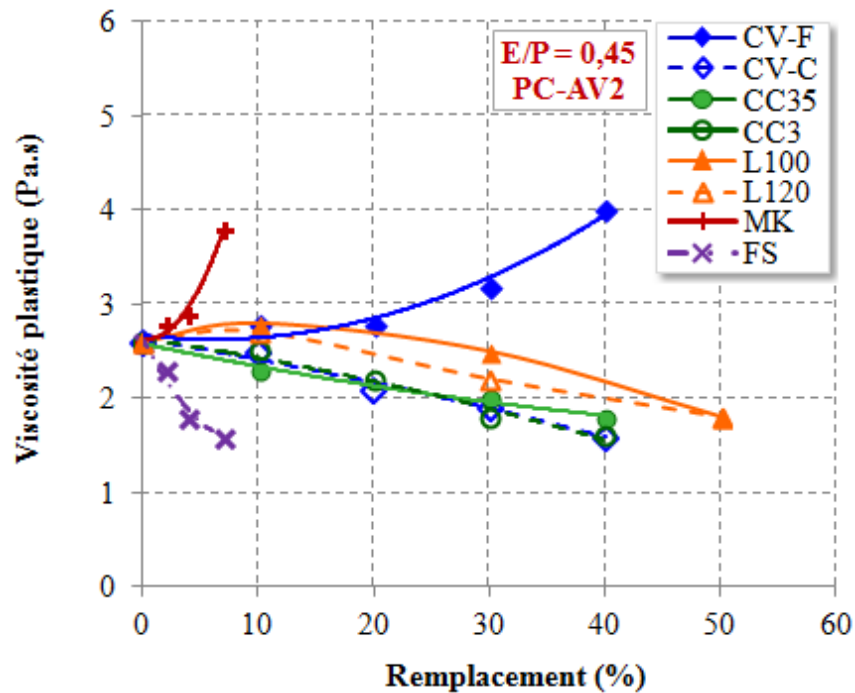


Figure 5.8 Viscosité plastique à 10 min des MBE-AP avec différents pourcentages d'AM en présence de PC-AV2 (SP-AV fixes)

D'autre part, la substitution massive du ciment par des poudres constituées de particules angulaires et allongées, comme L100, L120 et MK augmentent généralement la viscosité plastique, mais cet effet dépend de la combinaison SP-AV utilisé. L'augmentation la plus importante dans la viscosité plastique des MBE-AP est notée en présence de MK. En effet, un remplacement de ciment par MK allant à 7% entraîne une augmentation de la viscosité plastique l'ordre de 46% en présence de combinaison PC-AV2 et 24% en présence de la combinaison PNS-AV1. Inversement, l'augmentation de la fraction du laitier (L100 et L120) jusqu'à 20% augmente légèrement la viscosité plastique des MBE-AP en présence de PC-AV2, alors que cette augmentation semble être plus importante dans les MBE-AP en présence de la combinaison PNS-AV1. Encore une fois, l'efficacité du SP à disperser les AM et les fillers joue un rôle important dans la détermination des propriétés rhéologiques des mortiers.

La morphologie des particules et l'amélioration de la compacité résultant de l'incorporation des AM ou des fillers semblent être les principaux facteurs qui contrôlent la capacité d'écoulement des systèmes cimentaires très fluides. Cependant, il y a quelques exceptions. L'incorporation de particules sphériques de la CV-F résulte à une augmentation importante de la viscosité plastique, quel que soit la combinaison SP-AV comparativement aux MBE de référence.

5.2.1.3 Effet sur la perte de fluidité en fonction du temps

La rétention de l'ouvrabilité est un critère très important lors de la confection des bétons fluides. Comme le transport des bétons peut prendre plusieurs dizaines de minutes voir même plusieurs heures pour arriver au chantier de la construction, il est essentiel que le béton en question présente la maniabilité demandée lors de sa mise en place. Afin d'évaluer la contribution des AM et de la combinaison SP-AV dans le maintien de l'ouvrabilité des MBE en fonction du temps, les propriétés rhéologiques des MBE sont mesurées à 10, 30 et 60 min. Les figures 5.9 et 5.10 montrent l'évolution jusqu'à 60 min du seuil de cisaillement et de la viscosité plastique des MBE-AP pour les taux de remplacements maximaux en AM.

Généralement le seuil de cisaillement est influencé par le temps plus que la viscosité plastique. En présence de la combinaison PNS-AV1, le meilleur maintien du seuil de cisaillement est noté avec 40% de CV-C et de 40% de CC35. Tandis que pour les taux de substitution de 7% de FS, 50% de L120 et 7% de MK les augmentations dans le seuil de cisaillement étaient les plus importantes de 290%, 83% et 63%, respectivement. De l'autre côté, en présence de la combinaison PC-AV2, plusieurs taux de remplacement ont présenté un maintien quasi constant des propriétés rhéologique jusqu'à 60 min du temps de contact eau-ciment. De plus, les augmentations du seuil de cisaillement qui sont notés sont beaucoup moins importantes en comparaison avec ceux en présence de PNS-AV2. En effet, avec 50% L100, 50% L120 et 40% CVC le seuil de cisaillement est presque le même jusqu'à 60 min. Une élévation de 13% est notée avec 40% de CVF et l'augmentation la plus importante est de 50% avec 7% de MK.

Le choix de la combinaison SP-AV influence la rétention des propriétés rhéologiques des MBE avec le temps, vu que un comportement inverse est noté pour la plus part des AM. La combinaison PC-AV2 est celle qui a conféré un meilleurs maintien de la fluidité jusqu'à 60 min même si les MBE sont relativement moins fluides initialement (à 10 min).

La viscosité plastique est, généralement, moins affectée avec le temps (jusqu'à 60 min). Un léger accroissement ne dépassant pas 30% est noté pour CV-F, CV-C et MK en présence avec la combinaison PNS-AV1. La viscosité plastique des autres AM est quasi constante avec le temps pour la combinaison SP-AV.

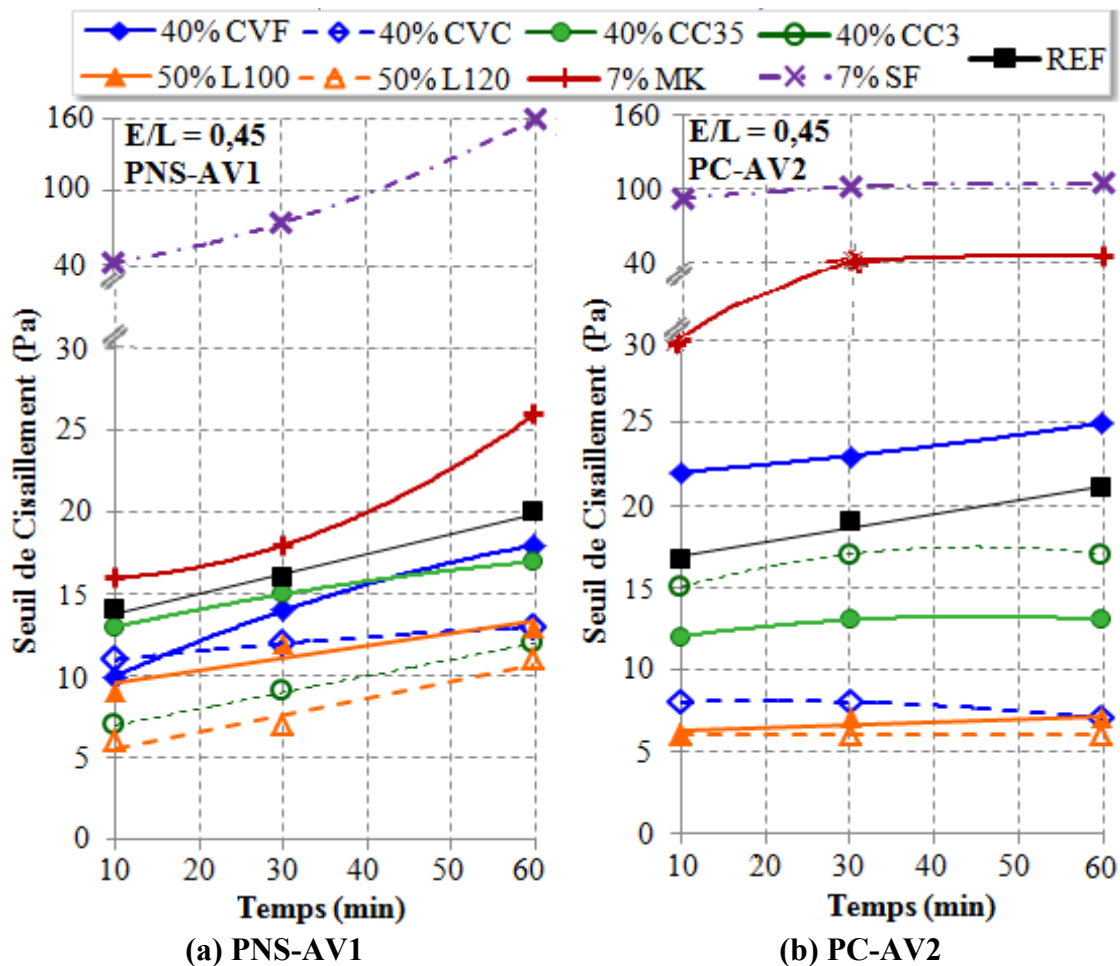


Figure 5.9 Évolution du seuil de cisaillement jusqu'à 60 min pour les taux de remplacement maximaux en AM en présence de a) PNS-AV1, b) PC-AV2 (SP-AV fixes)

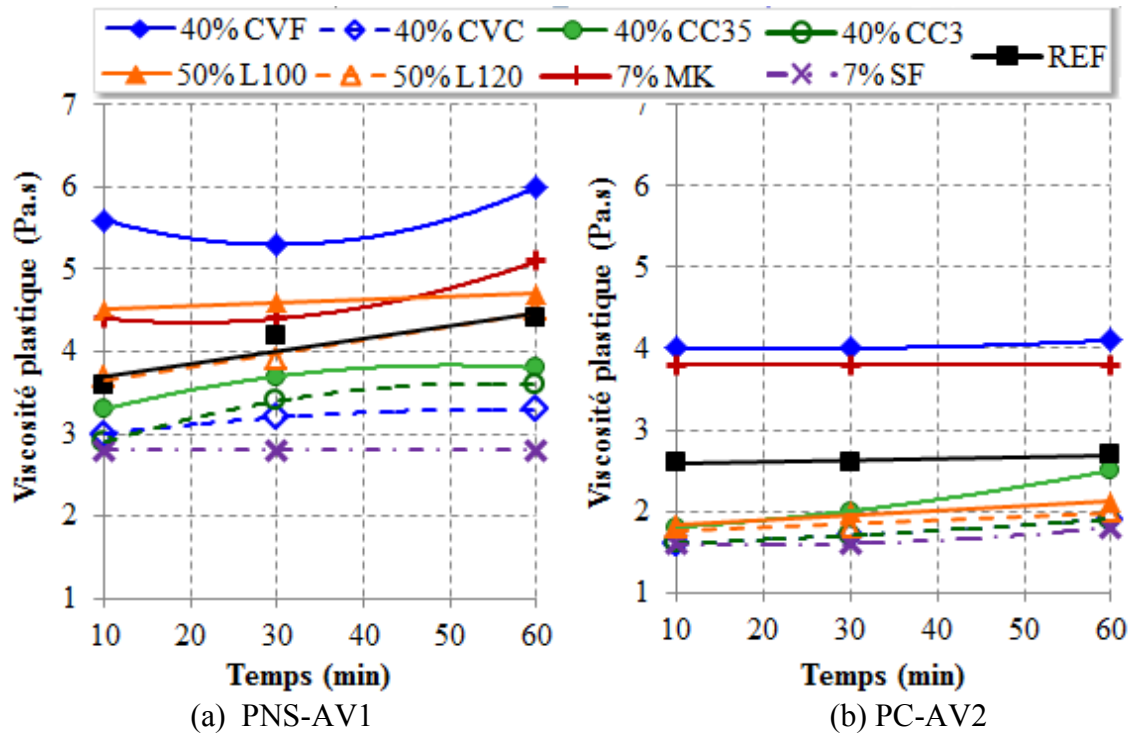


Figure 5.10 Évolution de la viscosité plastique jusqu'à 60 min pour les taux de remplacement maximaux en AM et filler en présence de a) PNS-AV1 b) PC-AV2 (SP-AV fixes)

5.2.1.4 Effet des AM et de la combinaison SP-AV sur la stabilité

L'essai du ressuage forcé est employé pour évaluer la contribution des différents AM et des fillers avec différents taux de substitution dans la stabilité des MBE-AP. Il est considéré que le pourcentage du ressuage forcé est affecté par la quantité d'eau libre qui n'est pas retenue physiquement et chimiquement dans la matrice cimentaires. Une matrice bien dispersée avec une compacité élevée peut présenter une faible perméabilité et par conséquent une diminution dans la perte d'eau [Khayat et coll., 2008]. Les résultats du ressuage forcé, exprimés en pourcentage de la quantité d'eau séparé du volume total d'eau présent dans l'échantillon, en présence des combinaisons PNS-AV1 et PC-AV2 sont présentés dans les figures 5.11 et 5.12, respectivement.

La première observation qui attire l'attention est l'écart important entre les résultats du ressuage forcé obtenues en présence de la combinaison PNS-AV1 en comparaison avec ceux en présence de PC-AV2. En effet, le ressuage forcé en présence de la dernière combinaison est, généralement, trois fois plus important que celui en présence de la première combinaison. Parallèlement, les résultats obtenus lors de l'essai de conductivité électriques effectué sur les mélanges de référence (§ 4.3) ont bien montré que le mélange "REF PNS-AV1" présente une stabilité plus élevée que celle du mélange "REF PC-AV2", mais que la stabilité de ce dernier est tout à fait acceptable, du moment que l'indice de stabilité reste supérieur à 96% et que la quantité d'eau ressuée ne dépasse pas 0,03%. Cette différence est due principalement à la capacité des AV utilisés à retenir l'eau dans la matrice. Il faut rappeler que les mélanges en présence de PC-AV2 ont présenté des viscosités plastiques sensiblement inférieures à celles en présence de PNS-AV1.

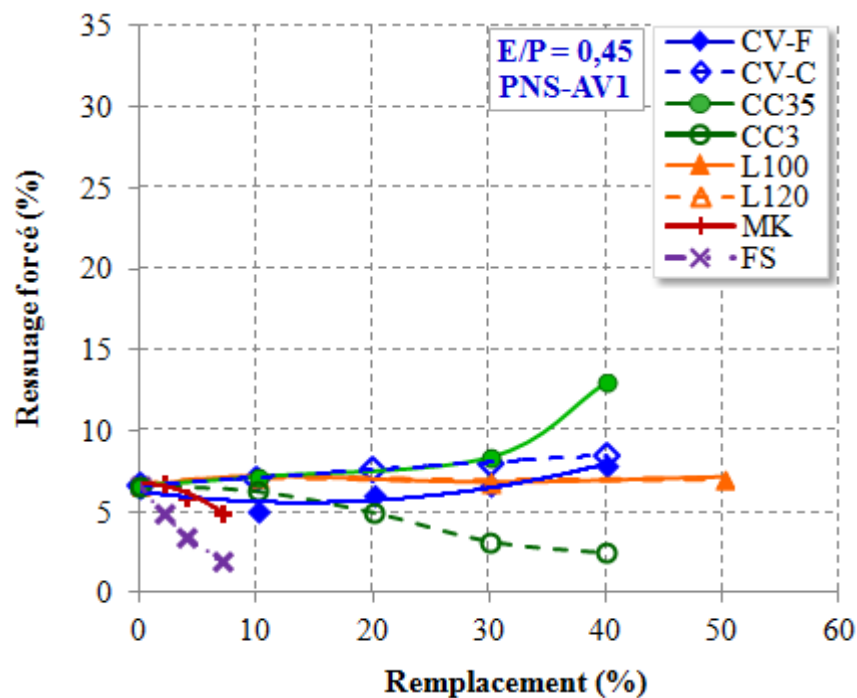


Figure 5.11 Effet de du taux de remplacement en AM sur le ressuage forcé des MBE-AP en présence de la combinaison PNS-AV1 (SP-AV fixes)

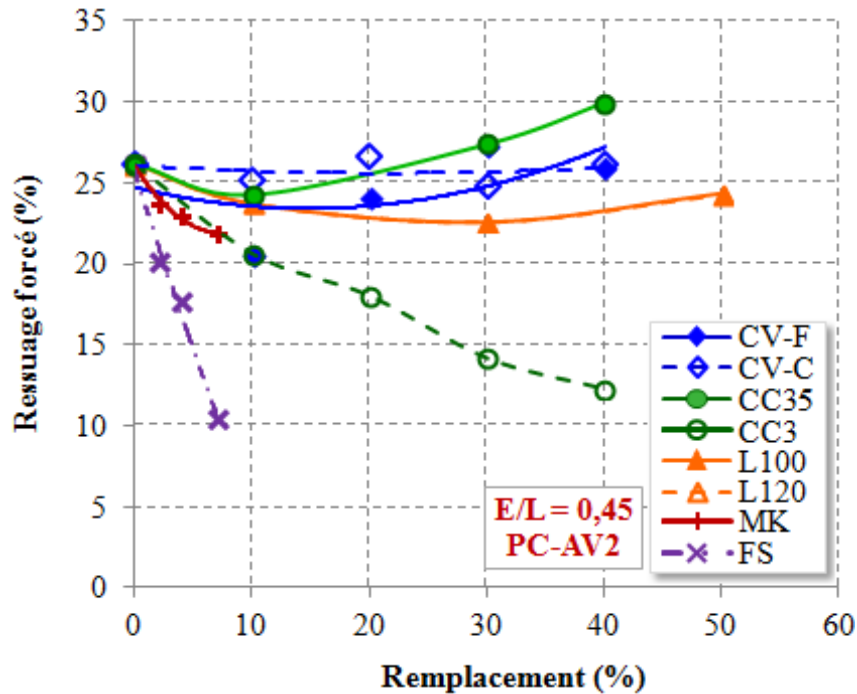


Figure 5.12 Effet de du taux de remplacement en AM sur le ressuage forcé des MBE-AP en présence de la combinaison PC-AV2 (SP-AV fixes)

Par ailleurs, il apparaît clairement que les AM et les fillers à finesse élevée comme la FS, MK et le CC3 ont tendance à diminuer le ressuage forcé. En effet, une diminution de l'ordre de 70 et 60% est noté avec 7% de FS, en présence de PNS-AV1 et PC-AV2 respectivement. Ce qui est logique dû à l'augmentation de la surface spécifique à mouiller, qui diminue sensiblement la quantité d'eau libre dans les mélange. Par contre, les AM présentant une finesse proche ou légèrement plus importante à celle du ciment Portland, tel que la CV-F, CV-C, L100 et le L120, ont présenté des pourcentages de ressuage forcé très comparable à celle des mélanges de référence quel que soit la combinaison SP-AV utilisée. Quant au filler à finesse modérée, le CC35, l'augmentation de son taux de remplacement augmente le ressuage forcé jusqu'à 50% pour 40% de remplacement en présence de PNS-AV1.

5.2.1.5 Synthèse

Les résultats de l'effet du remplacement partiel du ciment par des AM, fillers et du type de la combinaison SP-AV sur les propriétés rhéologiques et la stabilité des MBE-AP ont montré que :

- Les propriétés rhéologiques des MBE-AP sont très affectées par le type de combinaison SP-AV utilisée. En effet, l'effet des AM ou des fillers sur le seuil de cisaillement est plus important en présence de PC-AV2 qu'en présence de PNS-AV1. De même pour la viscosité plastique, où il paraît que les MBE-AP contenant PNS-AV1 sont les plus visqueux.
- La CV-F et le CC3 ont montré un comportement inverse dépendamment de la combinaison SP-AV. Le seuil de cisaillement semble diminué en présence de PNS-AV1 alors qu'il a augmenté en présence de PC-AV2.
- En présence de PNS-AV1, un remplacement de 2% en FS ou 4% en MK semble avoir un effet bénéfique sur la fluidité, ce qui n'est pas noté en présence de PC-AV2.
- Le remplacement partiel du ciment par le MK affecte considérablement la viscosité plastique des MBE. L'utilisation de cet ajout est très recommandée pour des applications qui nécessitent des mélanges visqueux.
- Les propriétés rhéologiques semblent être améliorées avec des taux de remplacement élevées en L100 et L120 surtout en présence de PNS-AV1.
- Une attention particulière doit être apportée lors de la conception des BAP, en utilisant les AM et les fillers qui ont tendance à diminuer simultanément le seuil de cisaillement et la viscosité plastique, comme la CV-C et le CC35, à cause du risque accru sur la stabilité de ces mélanges.
- Le seuil de cisaillement des MBE-AP est affecté par le temps plus que la viscosité plastique.
- Le remplacement partiel du ciment par des AM et des fillers à finesse très élevée comme la FS et le CC3 contribue à augmenter sensiblement la résistance au ressuage forcé.

5.2.2 Effet des AM et de la combinaison SP-AV sur l'hydratation et le développement des résistances des MBE-AP

Après avoir étudié l'effet du remplacement partiel du ciment par des AM ou des fillers avec deux différentes combinaisons de SP-AV sur les propriétés rhéologiques des MBE-AP, il était important d'étudier leur effet sur l'hydratation et le développement des résistances à la compression à 1, 28 et 91 jours.

5.2.2.1 Dégagement de chaleur

L'effet des AM et des fillers sur la cinétique d'hydratation des MBE-AP est suivi avec le calorimètre isotherme, le TAM Air, décrit dans le chapitre 3. Le flux de chaleur ainsi que la chaleur totale dégagée par l'hydratation des MBE-AP binaires, en présence des deux combinaisons PNS-AV1 et PC-AV2, sont présentés dans les figures 5.13 – 5.29. Les dosages en SP et en AV sont gardés constants pour tous les mélanges.

Les courbes de flux de chaleur des MBE-AP ont toutes présenté les quatre périodes de la réaction d'hydratation, période : initiale, dormante, d'accélération et de décélération. La période initiale, qui se caractérise par un important dégagement de chaleur et l'apparition d'un premier pic d'hydratation, causé principalement par la réaction du C_3A avec le gypse et la dissolution du C_3S , n'est pas mesurée dans cette étude, car le malaxage a eu lieu à l'extérieur du calorimètre et donc ne sera pas discuté. Par la suite, la réaction d'hydratation traverse une période dormante durant laquelle les réactions chimiques et le flux de chaleur sont très faibles.

Pour les deux mélanges de référence, le type de la combinaison SP-AV, semble affecter considérablement la durée de la période dormante (figure 5.13). En présence de la combinaison PNS-AV1, la durée de la période dormante est de 7,3 h alors qu'elle de 3,5 h en présence de PC-AV2. Cette période prend fin lorsque la concentration des ions Ca^{+} et OH^{-} devient critique et que la couche protectrice, formée sur les particules de l'alite après leur premier contact avec l'eau, se décompose et devient plus perméable. Permettant ainsi à l'alite de continuer à se dissoudre et à la formation du C-S-H et la précipitation du CH. Ceci se

traduit par une accélération du processus d'hydratation jusqu'à l'apparition d'un deuxième pic d'hydratation.

Pour les deux types de combinaisons SP-AV, la montée du flux de chaleur ainsi que l'intensité du deuxième pic d'hydratation, sont très semblables. Ce pic est suivi par une période de décélération, pour laquelle un troisième pic d'hydratation, qui est lié à la transformation de l'ettringite en monosulfate d'alumine ainsi qu'à la reprise d'hydratation du C_3A , peut apparaître. Pour les deux mélanges références (REF-PNS et REF-PC), le troisième pic se présente sous forme d'une légère bosse lors de la descente de la courbe du flux de chaleur. Ce pic est légèrement plus apparent dans le cas de PC-AV2. Bien que les réactions d'hydratation continuent à se poursuivre après le troisième pic mais le taux de chaleur diminue considérablement. Au bout de 40 heures d'hydratation, la chaleur totale dégagée par les MBE-AP en présence de PC-AV2 est légèrement supérieure en comparaison avec la présence de PNS-AV1 (Tableau 5.1).

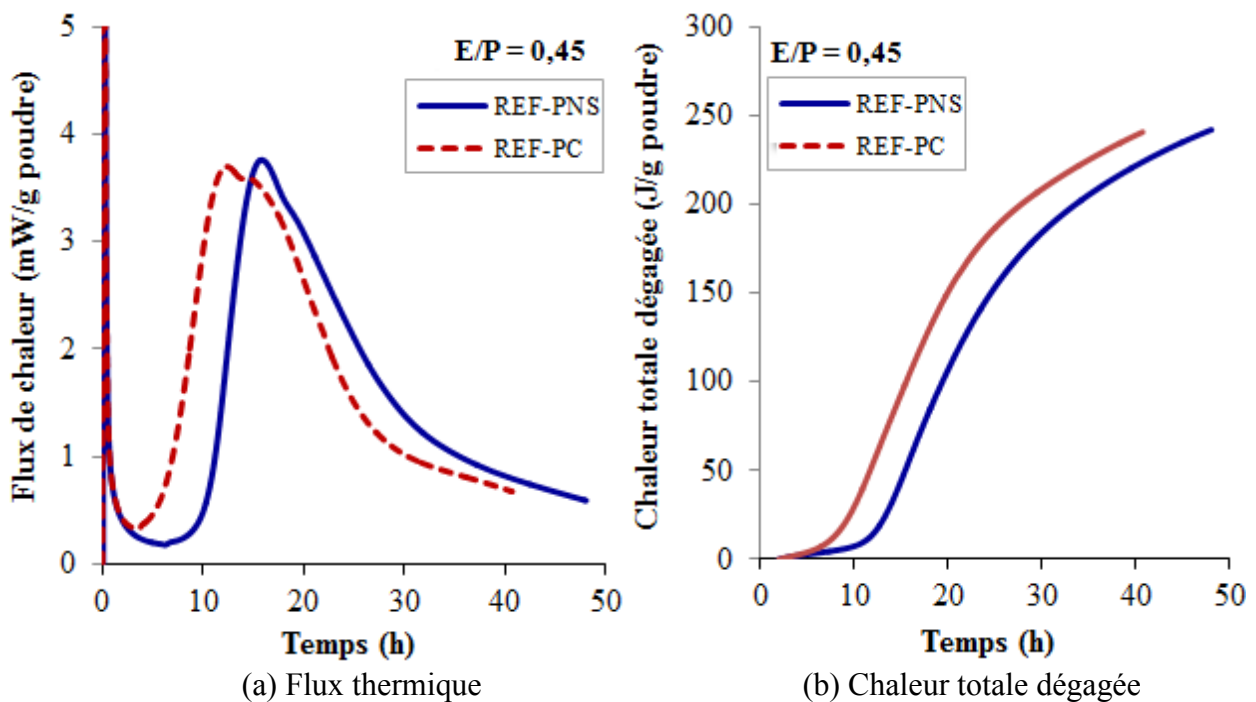


Figure 5.13 Effet du type du couple SP-AV sur la chaleur dégagée des MBE-AP

Les figures 5.14 et 5.15, présentent l'influence de la CV-F et de son taux de remplacement sur la cinétique d'hydratation en présence des combinaisons PNS-AV1 et PC-A2, respectivement. L'augmentation du taux de remplacement du ciment par la CV-F jusqu'à 40% en présence de PNS-AV1, entraîne un prolongement jusqu'à 6 h de la période dormante avec une réduction de la chaleur dégagée lors de cette période, en comparaison avec le mélange de référence. Par la suite, le processus d'hydratation s'accélère mais de façon moins importante où l'intensité du deuxième pic du flux thermique peut être diminuée jusqu'à 40% avec le taux de remplacement maximal en CV-F. L'apparition du troisième pic d'hydratation devient plus prononcée avec l'accroissement du taux de la CV-F, où son intensité dépasse même celle du deuxième pic pour 40% de CV-F.

De même pour de la combinaison PC-AV2, la CV-F ralentit l'hydratation des MBE-AP mais de façon moins significatif en comparaison avec la première combinaison. En effet, un prolongement de la période dormante de 2 h et une réduction dans l'intensité du deuxième pic de 43% sont notés avec 40% de CV-F. De même que pour la 1^{ère} combinaison, le troisième pic d'hydratation est d'autant plus apparent que le pourcentage en CV-F, et dépasse de 10% l'intensité du deuxième pic pour 40% de remplacement.

Dans le cas de la CV-C, le type de la combinaison SP-AV semble aussi affecter sensiblement l'évolution du flux thermique d'hydratation des MBE-AP (figures 5.16 et 5.17). En effet, en présence de PNS-AV1, la durée de la période dormante est prolongée jusqu'à 11h par rapport au mélange de référence, pour un remplacement maximal de 40% en CV-C. Alors qu'en présence de PC-AV2, la période dormante est prolongée de 4 h. De plus, pour ce même taux de remplacement, l'amplitude du deuxième pic est réduite de 42% et 45% pour PNS-AV1 et PC-AV2 respectivement. Cependant, la durée du deuxième pic est plus élargie est coïncide avec l'apparition du troisième pic d'hydratation dans le cas de PC-AV2. Mais pour les deux cas de SP-AV, la CV-C a un effet ralentisseur plus significatif en comparaison avec la CV-F. Ceci se traduit par une durée de période dormante plus important de 35%, avec une chaleur totale dégagée légèrement moins importante, ce qui signifie que la CV-C utilisée est moins réactif que la CV-F.

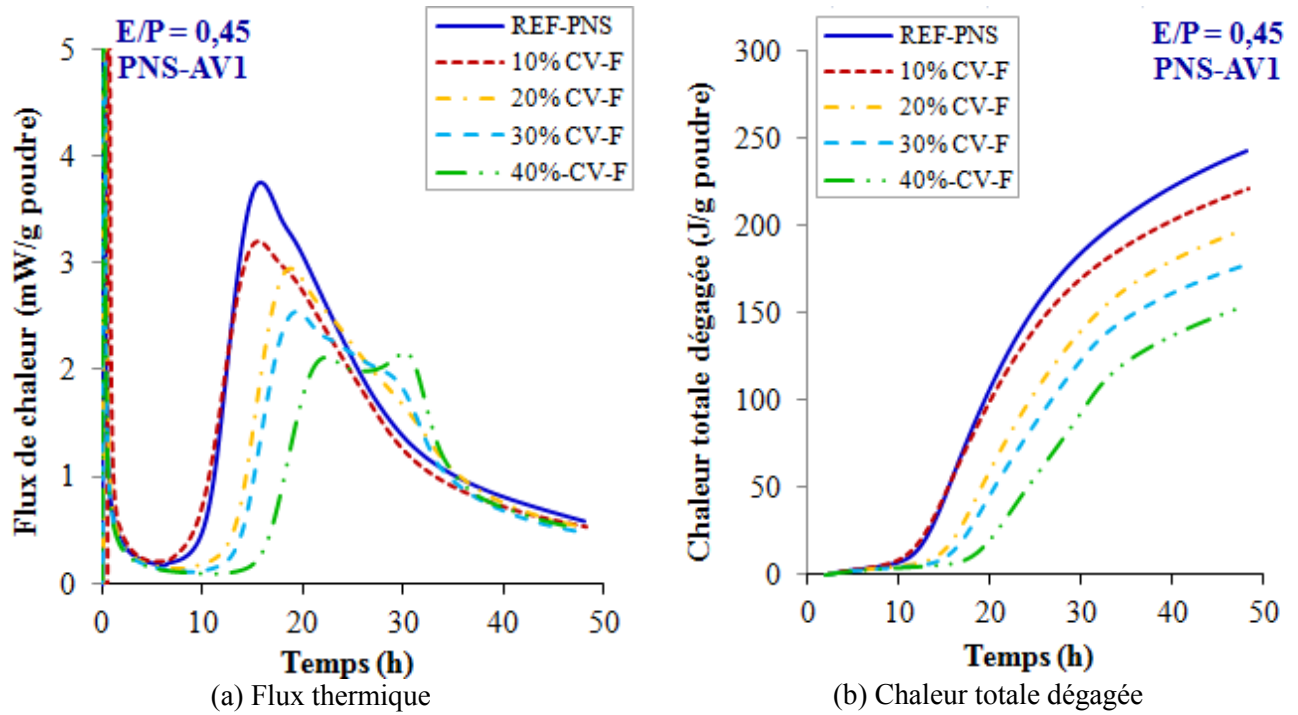


Figure 5.14 Effet du taux de remplacement de la CV-F sur la chaleur d'hydratation des MBE-AP en présence de PNS-AV1 (SP-AV fixes)

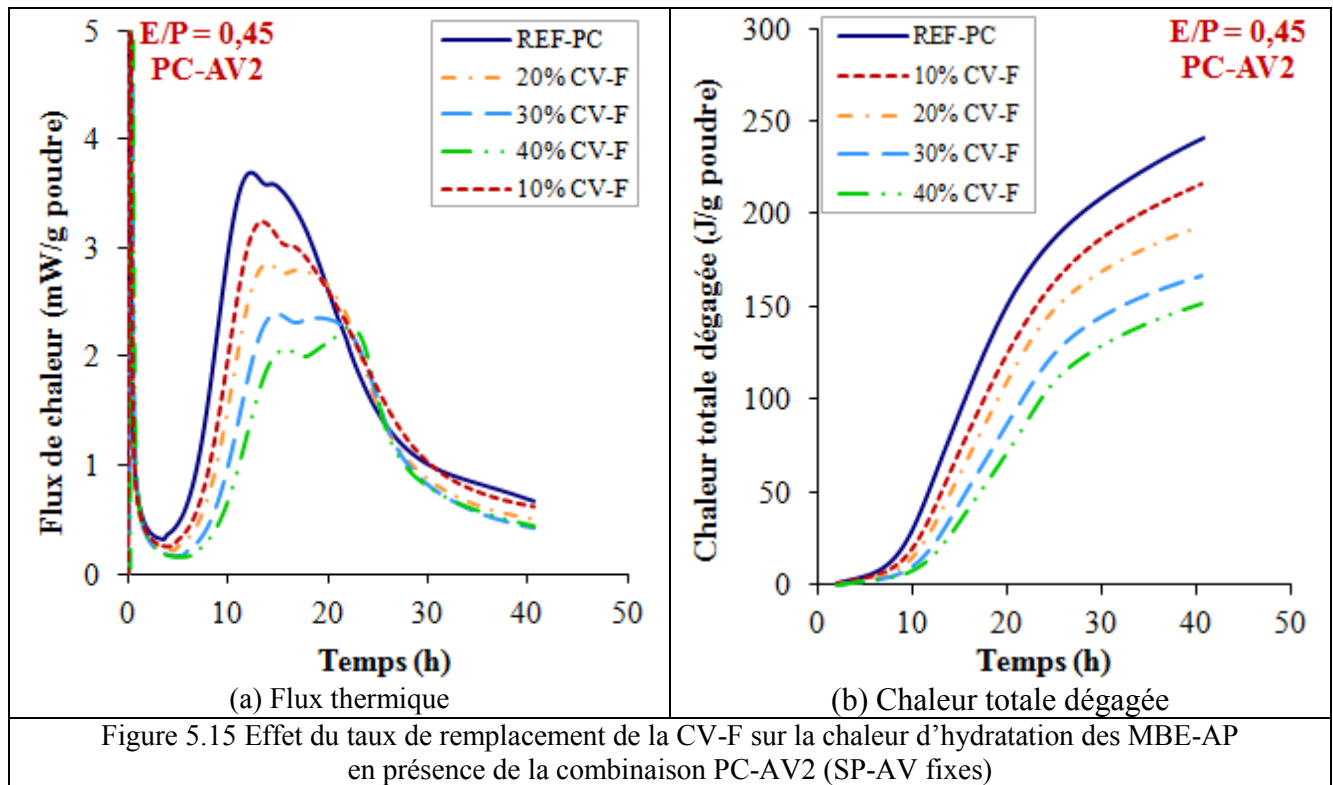


Figure 5.15 Effet du taux de remplacement de la CV-F sur la chaleur d'hydratation des MBE-AP en présence de la combinaison PC-AV2 (SP-AV fixes)

Par ailleurs, la figure 5.30 qui représente la relation entre le taux de remplacement des AM et l'intensité du pic d'hydratation, montre bien que le taux de remplacement de la CV a une influence plus significative sur le pic d'hydratation que le type de la CV. Ceci est lié au fait que le ciment est remplacé par un matériau pouzzolanique et que les réactions pouzzolanique sont lentes et dégagent moins de chaleur que la réaction du ciment Portland.

La chaleur générée par les MBE-AP contenant le filler calcaire à finesse modérée, CC35, avec les combinaisons PNS-AV1 et PC-AV2 respectivement, est présentée dans les figures 5.18 et 5.19. En présence de PNS-AV1, le remplacement de 10% de ciment portland par CC35 prolonge la période dormante de 3 h par rapport au mélange de référence. Mais l'augmentation de ce taux de remplacement de 10% à 40% n'a pas d'effet sur la durée de la période dormante du moment que la période d'accélération commence à 10,6 h pour les trois taux de remplacement étudiés. Alors qu'avec PC-AV2, la présence de CC35 semble ne pas affecter la durée de la période dormante. L'intensité du deuxième pic diminue de 10%, 30% et 44% en présence de PNS-AV1 et de 15%, 34% et 43% en présence de PC-AV1, pour 10%, 30% et 40% de remplacement, respectivement. En présence de PC-AV2, la durée du deuxième pic est élargie pour joindre le troisième pic d'hydratation, qui apparaît à 21h. Quand le filler calcaire CC3 est incorporé, les résultats du flux thermique montrent clairement que pour les deux types de combinaison en adjuvant, trois phénomènes sont notés. Un raccourcissement dans la durée de la période dormante, une accélération de l'hydratation avec diminution dans l'intensité du deuxième pic et l'intensité du troisième pic qui devient plus importante avec l'augmentation du taux de CC3, qui dépasse légèrement celle du deuxième pic à 40% de CC3 et en présence de PC-AV2. À 40% de CC3 et dans les deux cas de combinaisons SP-AV, la période dormante et le temps pour atteindre le deuxième pic d'hydratation sont raccourcis de 2 et 4,5 h, respectivement. De plus, l'intensité du deuxième pic a diminué de 31% et 33% en comparaison avec les MBE-AP de référence, en présence de PNS-AV1 et PC-AV2, respectivement.

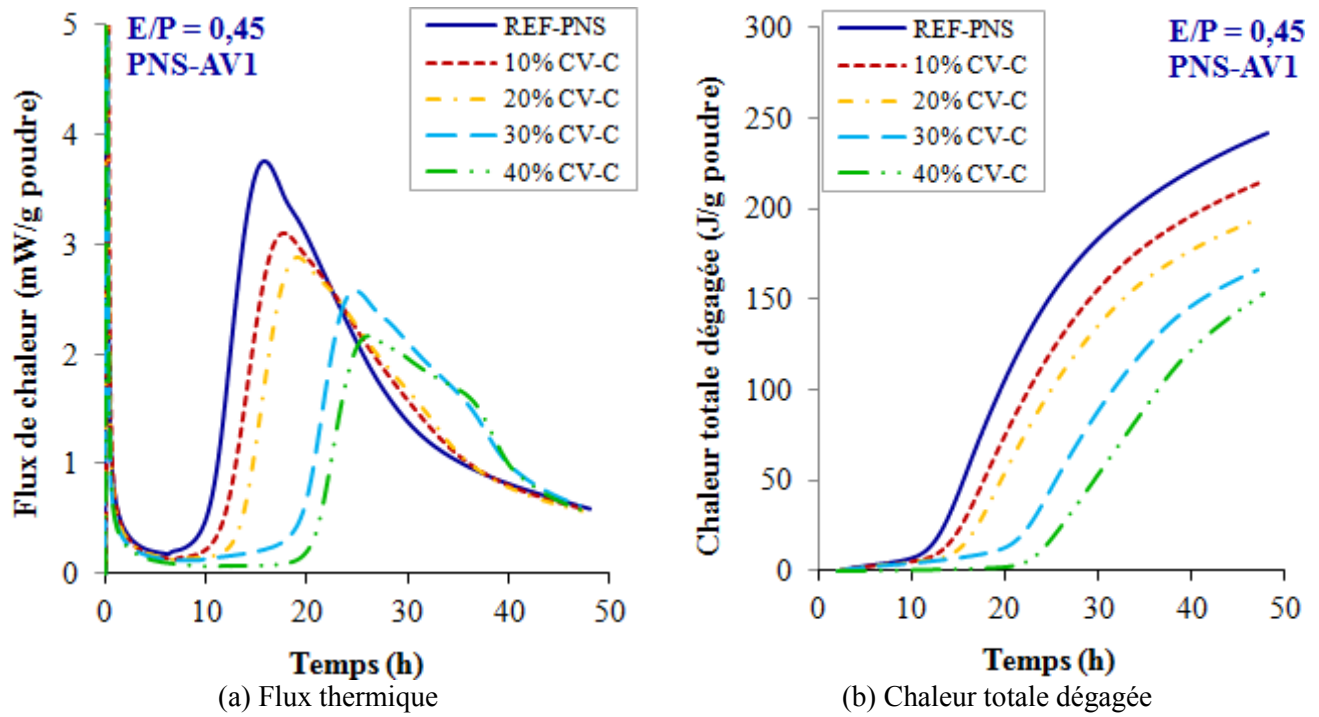


Figure 5.16 Effet du taux de remplacement de la CV-C sur la chaleur d'hydratation des MBE-AP en présence de la combinaison PNS-AV1 (SP-AV fixes)

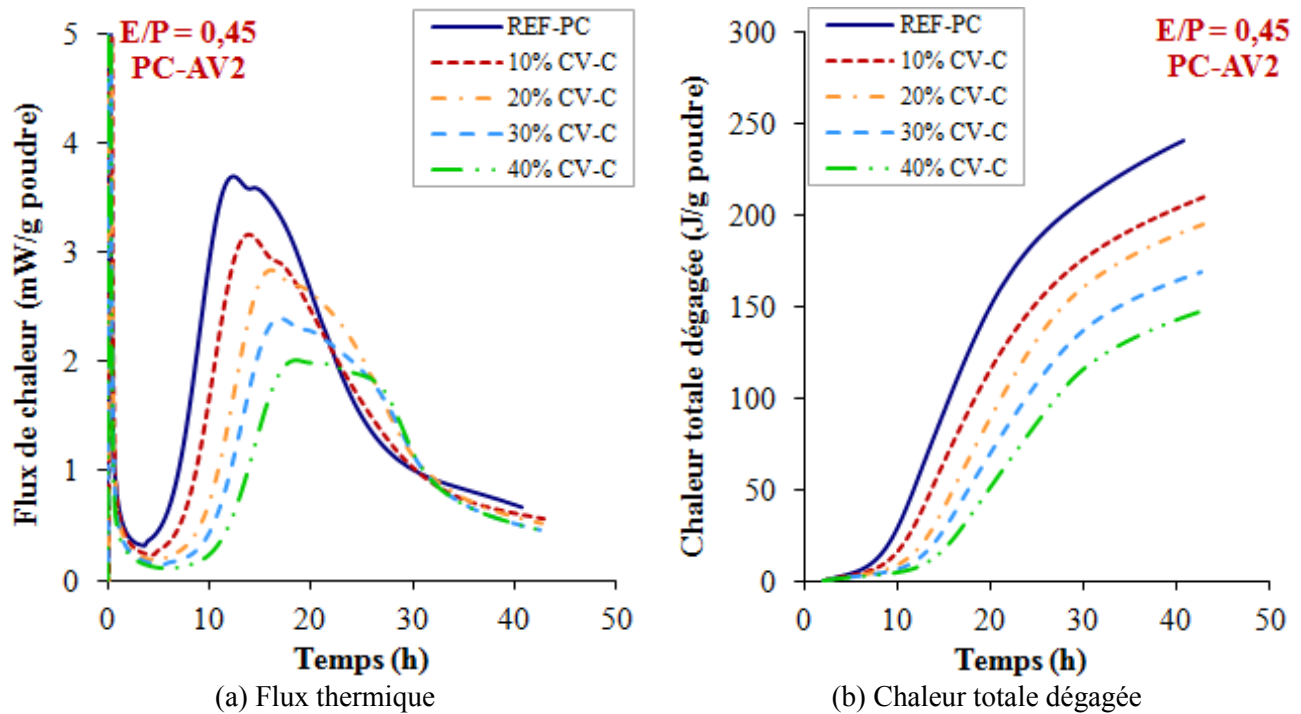


Figure 5.17 Effet du taux de remplacement de la CV-C sur la chaleur d'hydratation des MBE-AP en présence de la combinaison PC-AV2 (SP-AV fixes)

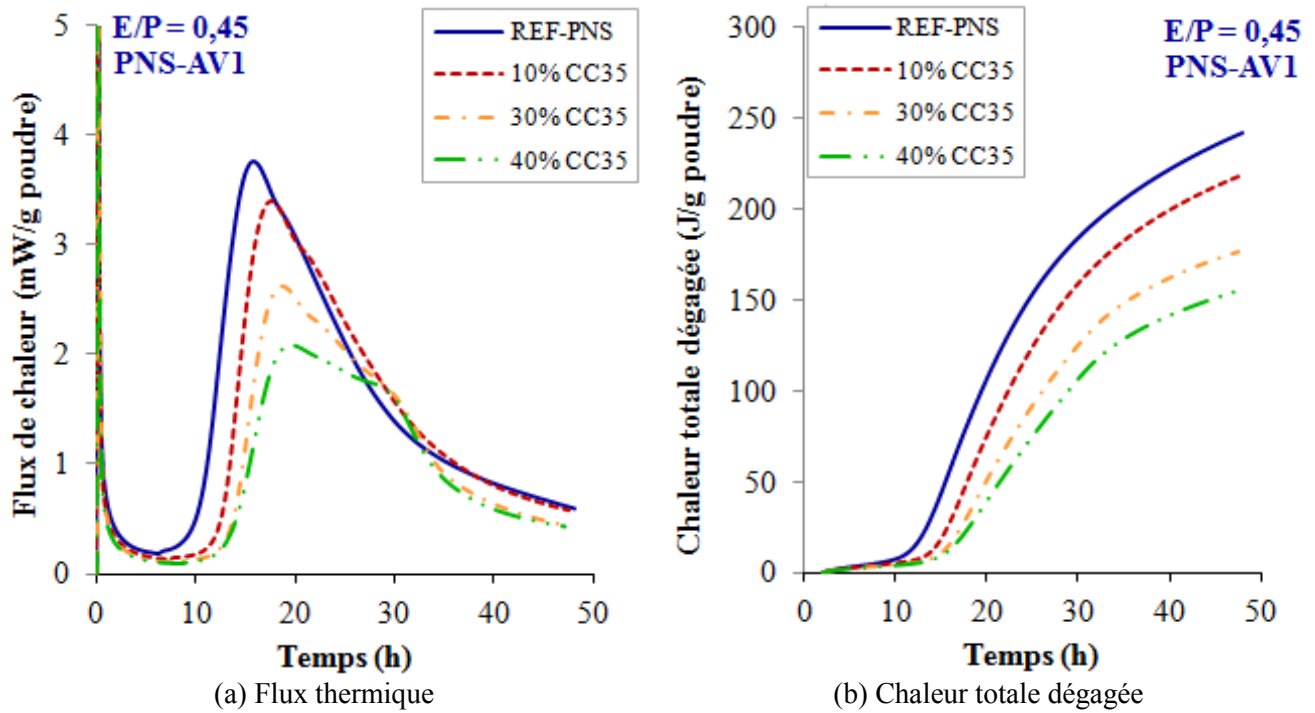


Figure 5.18 Effet du taux de remplacement de CC35 sur la chaleur d'hydratation des MBE-AP en présence de la combinaison PNS-AV1 (SP-AV fixes)

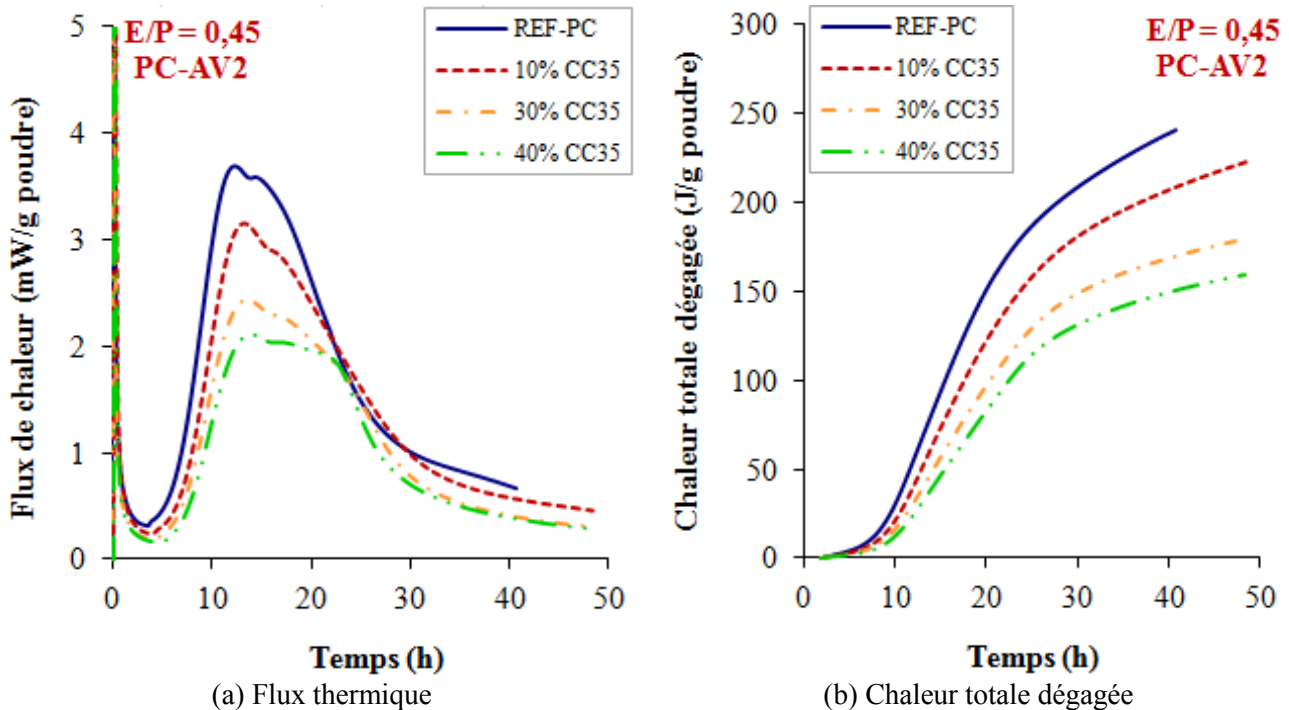


Figure 5.19 Effet du taux de remplacement de CC35 sur la chaleur d'hydratation des MBE-AP en présence de la combinaison PC-AV2 (SP-AV fixes)

L'accélération du processus d'hydratation en présence de filler calcaire CC3 est attribuée du fait qu'il est considéré que l'hydratation du C_3S est accélérée par la présence du $CaCO_3$, précisément quand le $CaCO_3$ présente une finesse élevée et avec un taux de remplacement élevé [Kadri et coll., 2002]. En effet, les particules fines des calcaires jouent le rôle de sites de nucléation pour la précipitation des hydrates cristallisés et favorisent la germination du C-S-H. Par ailleurs, une autre approche considère que les fillers calcaires ne sont pas totalement inertes et que les particules fines des calcaires peuvent réagir pour former monocarboaluminate [Klemm et coll., 1990; Bonavetti et coll., 2001; Kakali et coll., 2000].

Une fois de plus, l'effet de dilution dû au remplacement partiel du ciment par un AM à faible réactivité fait son apparence dans les courbes de dégagement de chaleur. En effet, les figures 5.22 - 5.25 mettent en évidence l'effet des laitiers L100 et L120, respectivement, sur chaleur d'hydratation des MBE-AP. La finesse du laitier n'a visiblement pas d'effet significatif sur la chaleur d'hydratation. L'augmentation du pourcentage de substitution, pour les deux finesesses du laitier, a entraîné un prolongement de la période dormante et un retard dans l'apparition du deuxième pic avec une diminution de son intensité. De plus, le troisième pic d'hydratation est aussi retardé mais qui prend son élan pour les taux de remplacement maximaux. Avec le laitier à finesse modérée, L100, la période dormante est prolongée d'un maximum de 6 et 3,5 h en présence de PNS-AV1 et PC-AV2, respectivement, alors qu'avec le laitier plus fin la période dormante est prolongée de 5 et 2 h en présence de PNS-AV1 et PC-AV2, respectivement. L'intensité du deuxième pic est de 2,2 et 2,3 mW/g, à 40% de remplacement en L100 et L120 en présence de PNS-AV1 et de 1,77 et 1,80 mW/g à 50% de remplacement en L100 et L120 en présence de PC-AV2. L'augmentation dans l'intensité du troisième pic d'hydratation avec l'accroissement du taux de L100 ou L120, indique qu'à ce stade d'hydratation une quantité suffisante de CH s'est formée pour activer la réaction d'hydratation du laitier. Visiblement, ce pic est plus intense avec un laitier plus fin (L120) et en présence de PC-AV2. En outre, la chaleur totale dégagée au bout de 40 h d'hydratation a diminué avec la présence du laitier, mais le L120 dégage plus de chaleur en présence de PC-AV2 en comparaison avec le L100 (tableau 5.1).

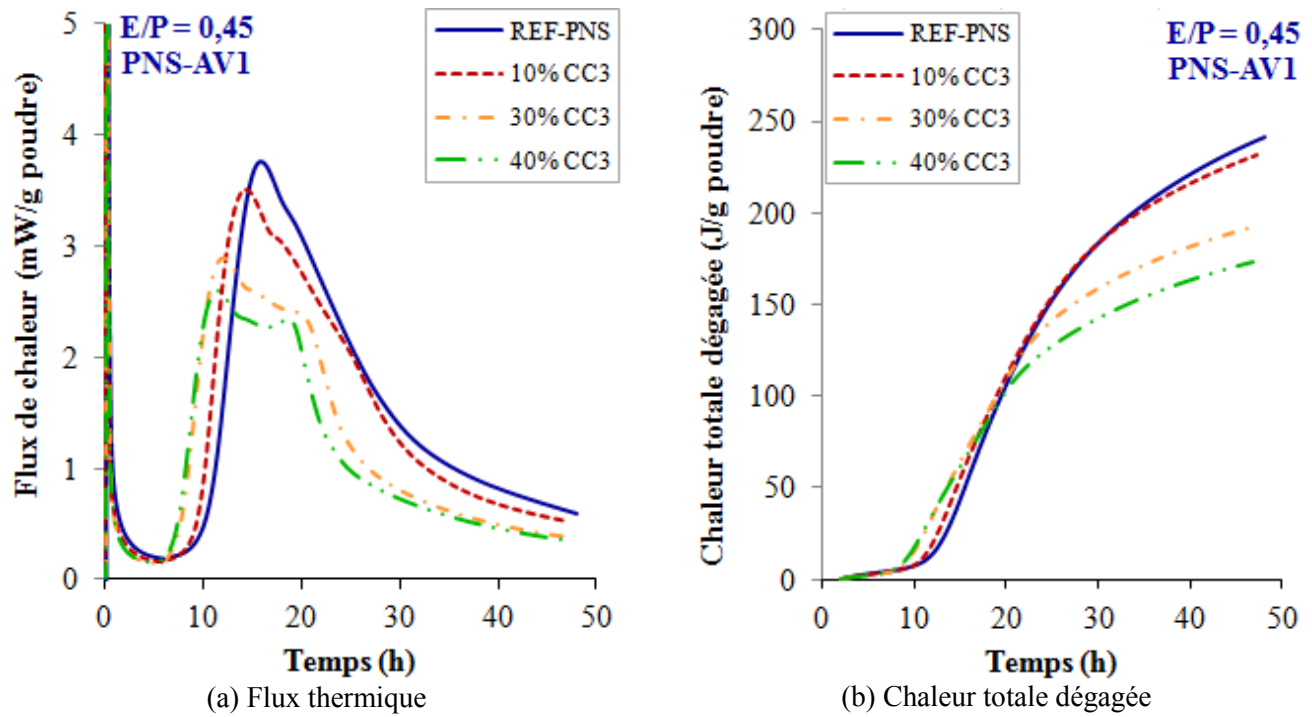


Figure 5.20 Effet du taux de remplacement de CC3 sur la chaleur d'hydratation des MBE-AP en présence de la combinaison PNS-AV1 (SP-AV fixes)

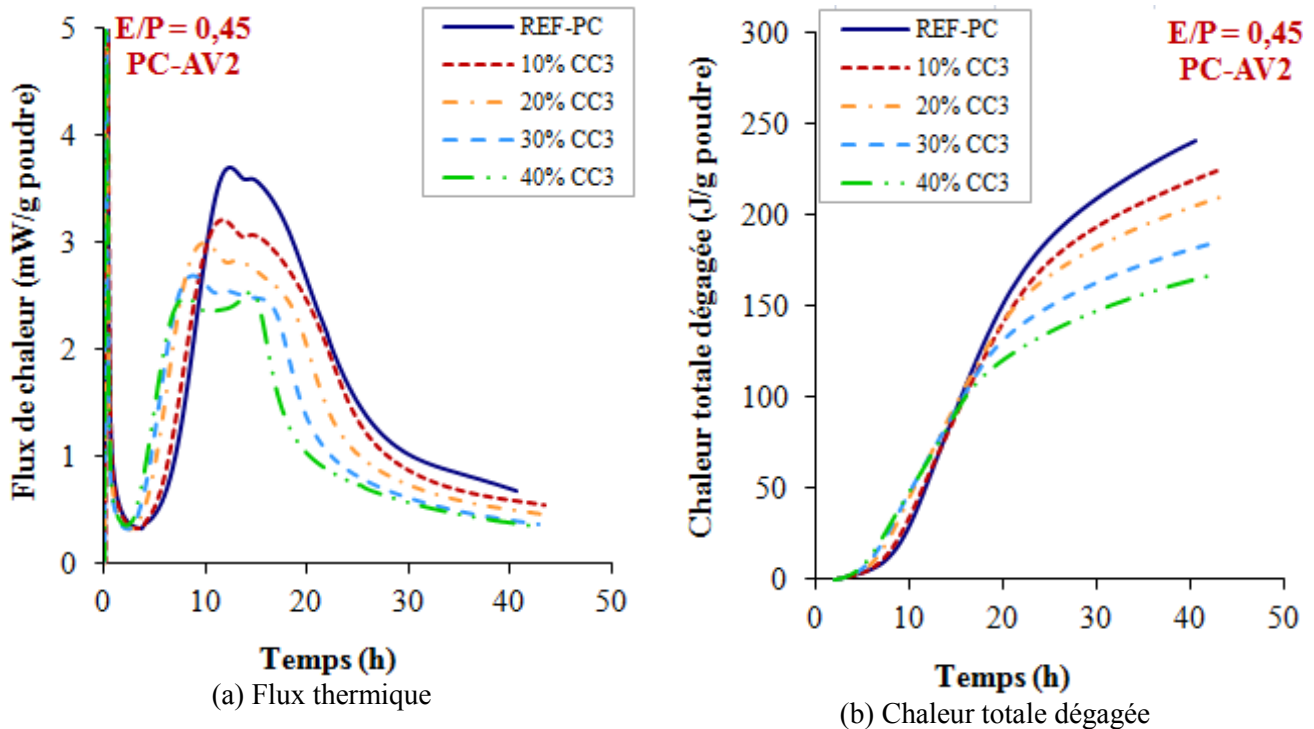


Figure 5.21 Effet du taux de remplacement de CC3 sur la chaleur d'hydratation des MBE-AP

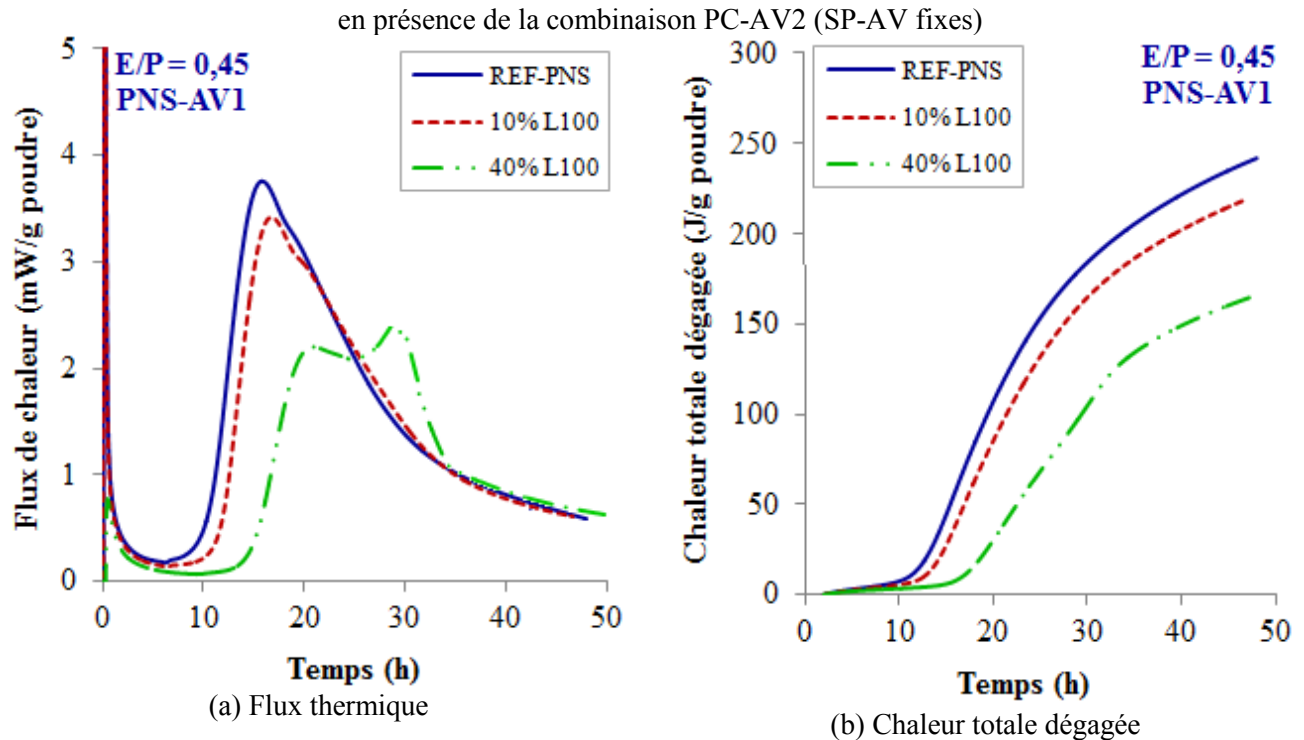


Figure 5.22 Effet du taux de remplacement du L100 sur la chaleur d'hydratation des MBE-AP en présence de la combinaison PNS-AV1 (SP-AV fixes)

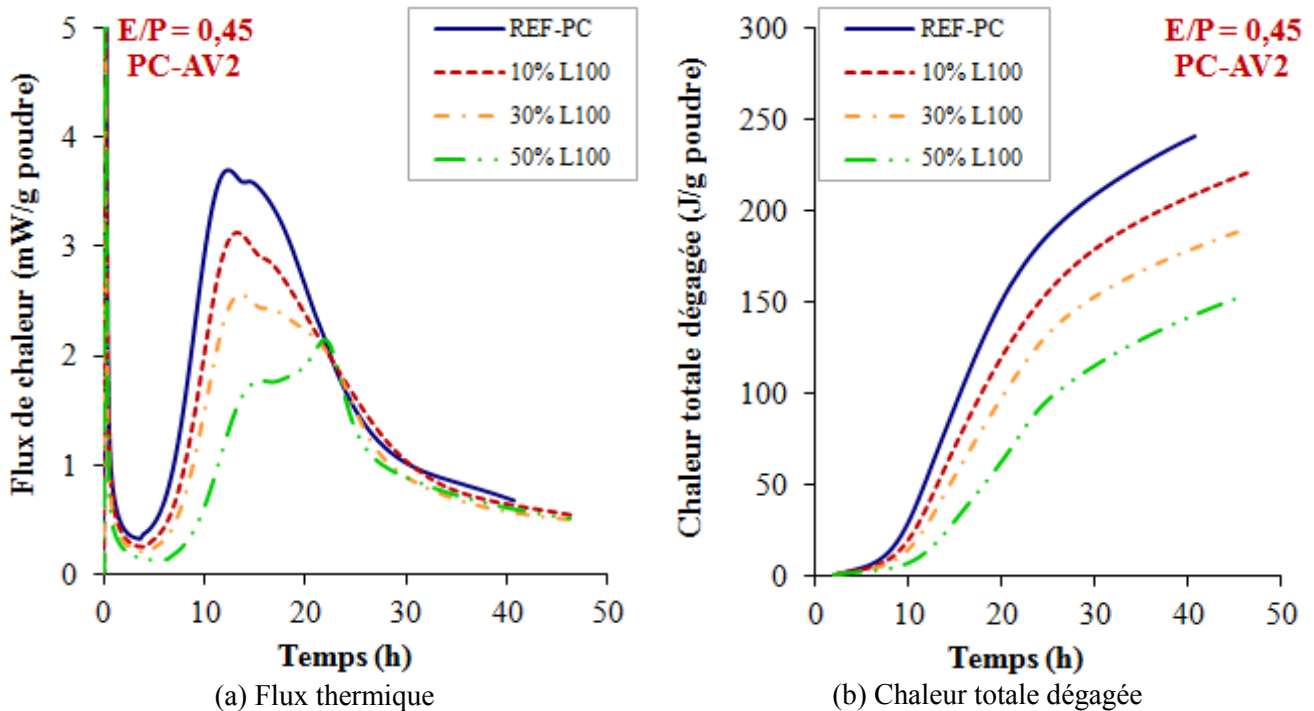


Figure 5.23 Effet du taux de remplacement du L100 sur la chaleur d'hydratation des MBE-AP en présence de la combinaison PC-AV2 (SP-AV fixes)

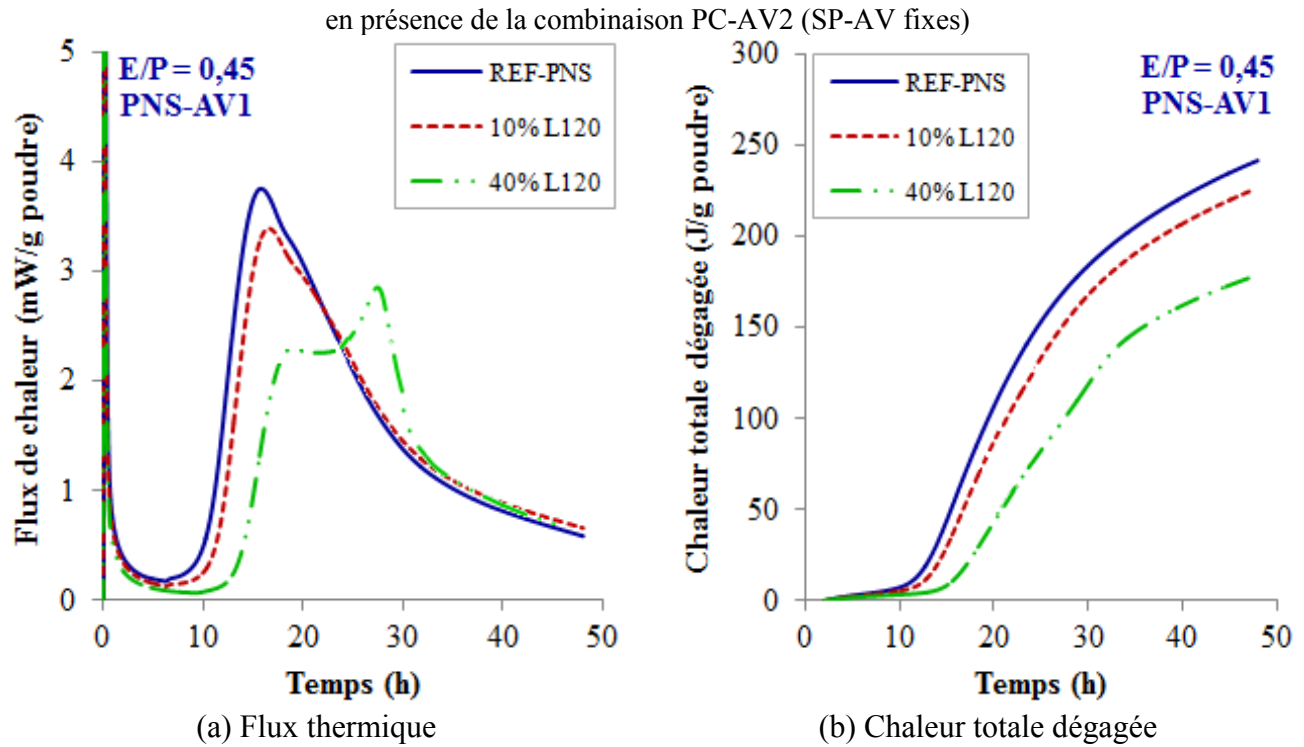


Figure 5.24 Effet du taux de remplacement du L120 sur la chaleur d'hydratation des MBE-AP en présence de la combinaison PNS-AV1 (SP-AV fixes)

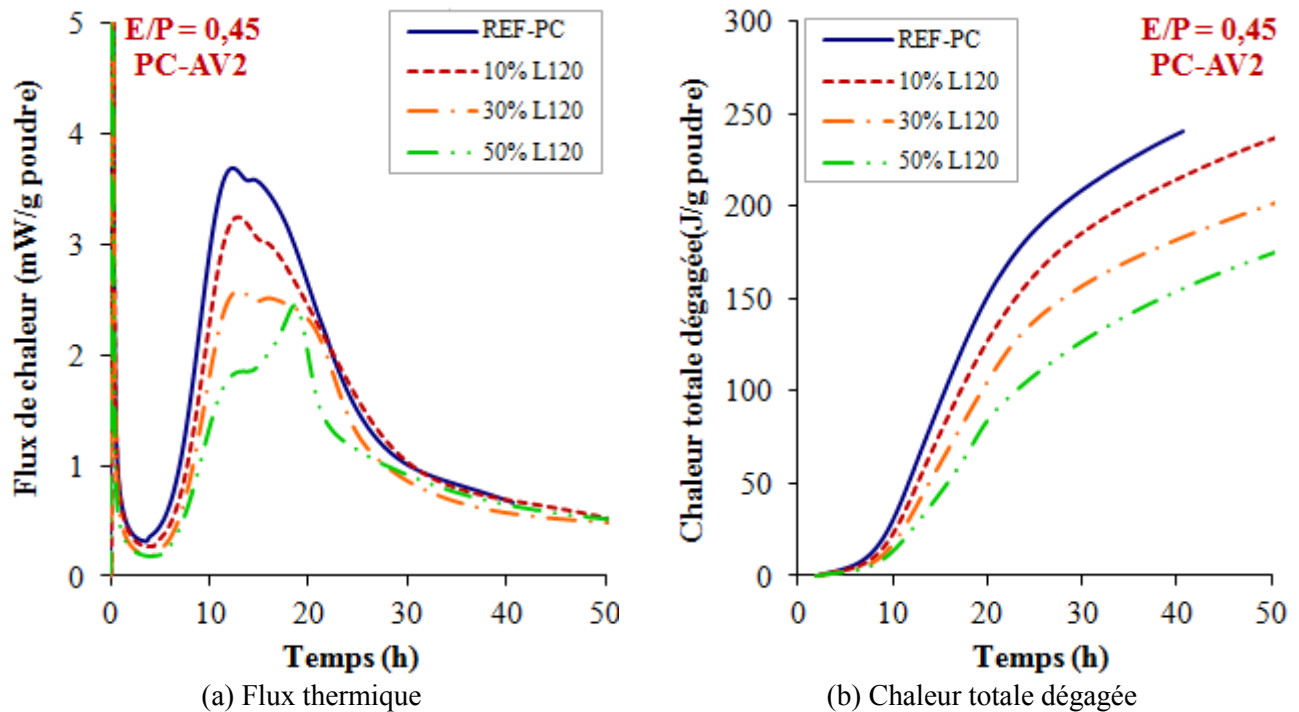


Figure 5.25 Effet du taux de remplacement du L120 sur la chaleur d'hydratation des MBE-AP

en présence de la combinaison PC-AV2 (SP-AV fixes)

Le remplacement partiel du ciment par le MK (2% à 7%) n'a vraisemblablement pas d'effet significatif sur le dégagement de chaleur des MBE-AP (figures 5.26 et 5.27). En effet, de légères réductions de 6% et 9% sont notées dans l'intensité du deuxième pic d'hydratation avec 7% de MK et en présence de PNS-AV1 et PC-AV2, respectivement. De plus, pour les différents pourcentages de MK et en présence de PNS-AV1, la chaleur totale dégagée en fonction du temps demeure la même que celle du mélange de référence, alors qu'en présence de PC-AV2, une légère diminution qui ne dépasse pas 9% est notée avec 7% de MK au bout de 40 h d'hydratation (tableau 5.1).

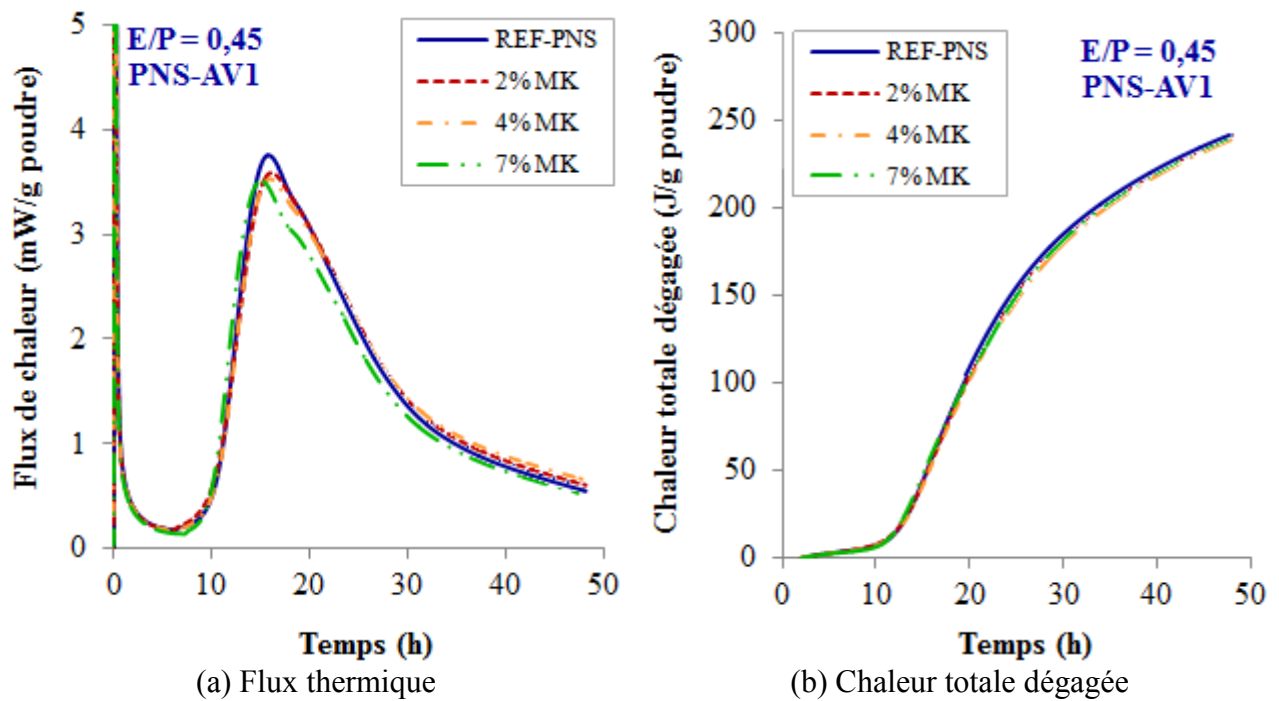


Figure 5.26 Effet du taux de remplacement du MK sur la chaleur d'hydratation des MBE-AP en présence de la combinaison PNS-AV1 (SP-AV fixes)

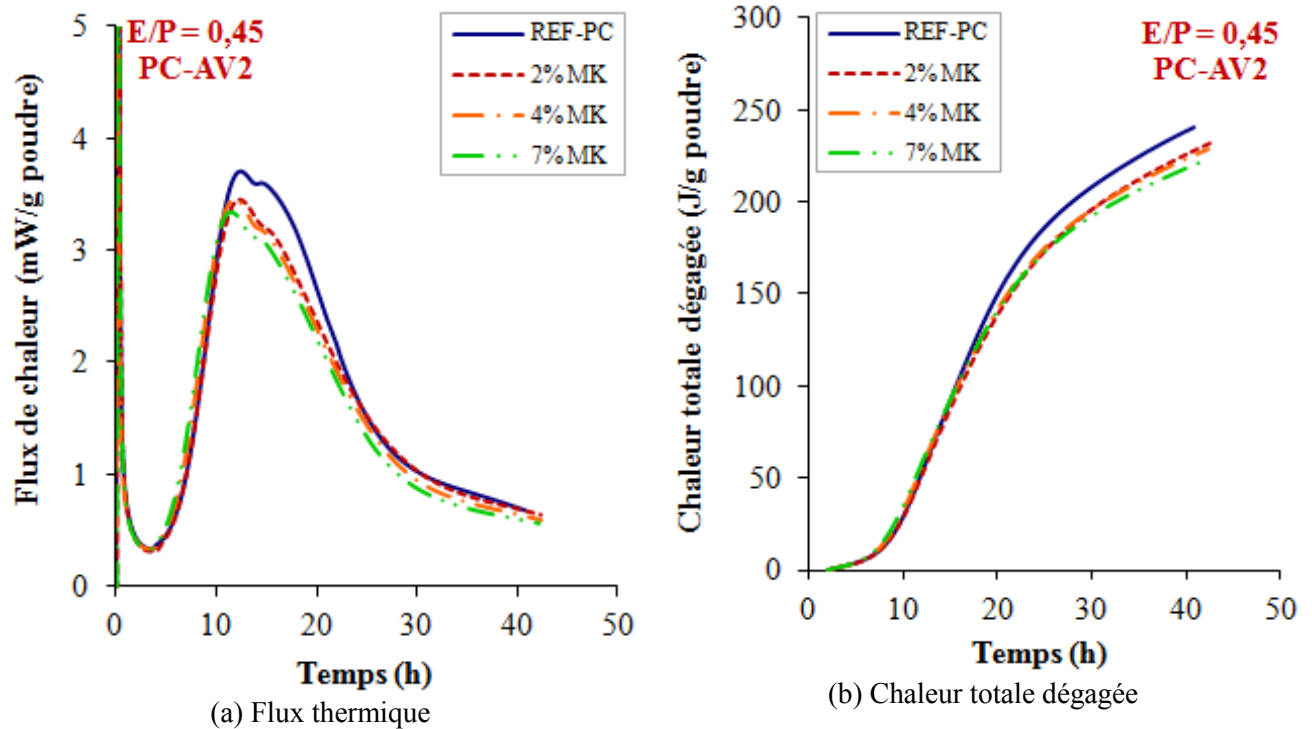


Figure 5.27 Effet du taux de remplacement du MK sur la chaleur d'hydratation des MBE-AP en présence de la combinaison PC-AV2 (SP-AV fixes)

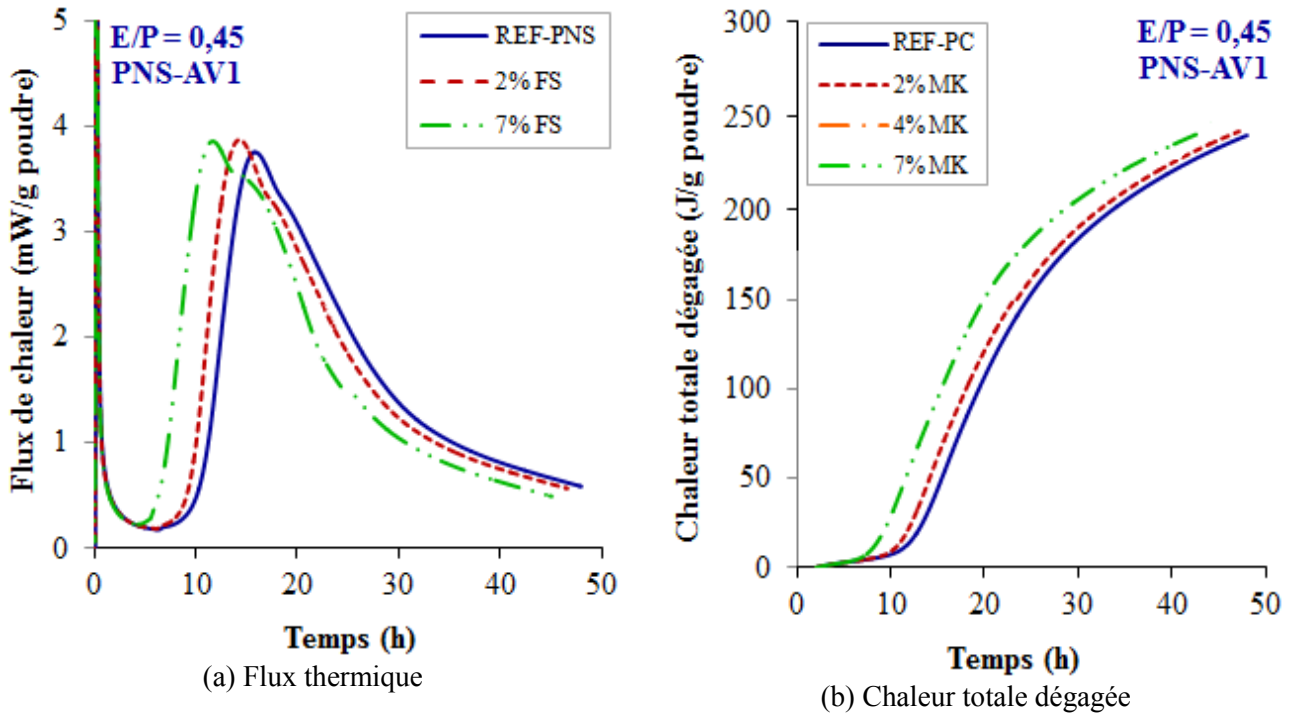


Figure 5.28 Effet du taux de remplacement de la FS sur la chaleur d'hydratation des MBE-AP

en présence de la combinaison PNS-AV1 (SP-AV fixes)

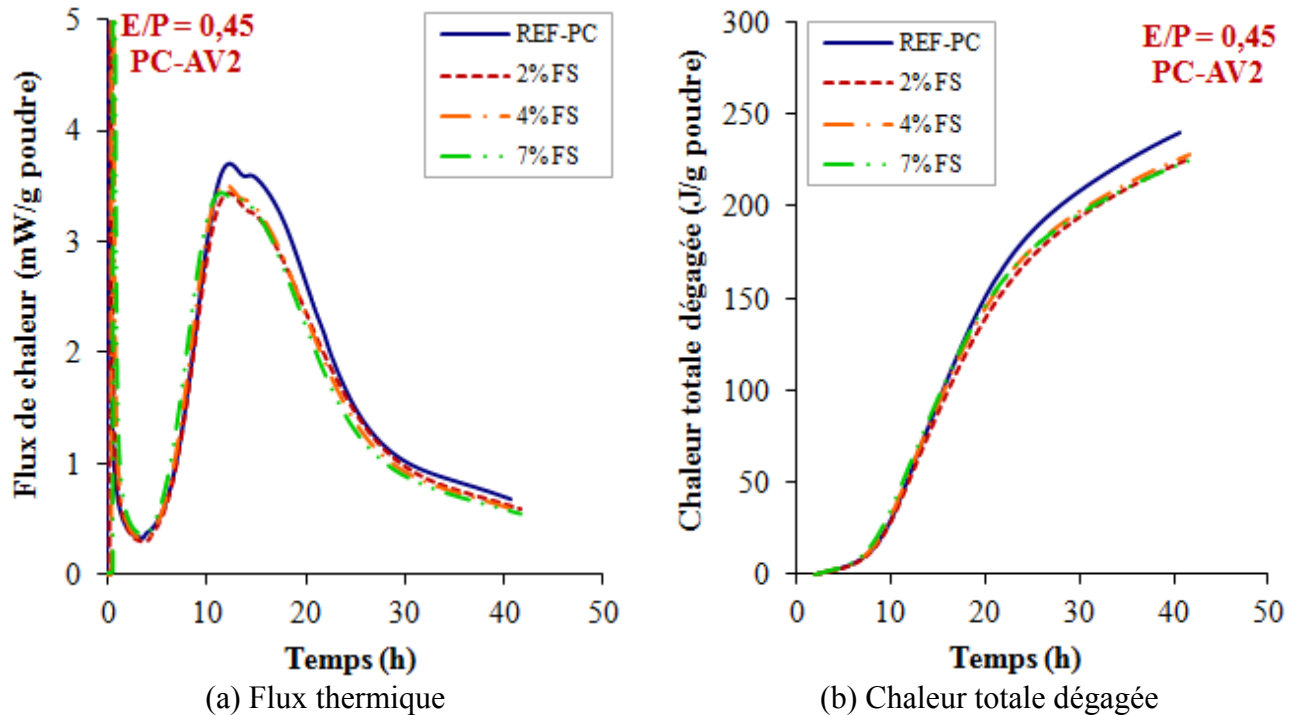


Figure 5.29 Effet du taux de remplacement de la FS sur la chaleur d'hydratation des MBE-AP en présence de la combinaison PC-AV2 (SP-AV fixes)

Par ailleurs, l'augmentation du remplacement du ciment de 2% à 7% de FS a engendré, en présence de PNS-AV1, un raccourcissement de la période dormante de 3 h avec une augmentation dans l'intensité du deuxième pic de 3,76 à 3,86mW/g (pour 0% et 7% de FS) (figure 5.28). Tandis qu'en présence de PC-AV2, la période dormante est raccourcie d'un maximum de 1 h et l'intensité du deuxième pic a diminué de 3,7 à 3,43 mW/g (pour 0% et 7% de FS) (figure 5.29). Pour le remplacement maximal en FS, La chaleur totale dégagée au bout de 40 h d'hydratation a augmenté d'un maximum de 6%, en présence de PNS-AV1. Alors qu'elle est réduite de 7,5% en présence de PC-AV2 (tableau 5.1).

La figure 5.30 met en évidence l'effet du taux de remplacement des différents AM sur l'intensité maximale du pic d'hydratation. Il apparaît clairement que les deux types de cendres volantes, les deux laitiers, le filler CC35 et le MK, présentent quasiment la même tendance linéaire entre le taux de remplacement et l'intensité du pic de chaleur quel que soit le type de

SP utilisé. Ceci indique que l'hydratation des MBE-AP contenant ces ajouts est gouvernée principalement par l'hydratation du ciment portland. Le filler calcaire CC3 a aussi présenté tendance linéaire, mais qui est supérieure à celle des AM susmentionné, ceci est dû à la participation de CC3 dans l'accélération de la réaction d'hydratation du ciment et probablement par leur propre réaction pour former monocarboaluminate. Par ailleurs, l'utilisation de la FS avec PNS-AV1 a présenté sa propre tendance, où l'intensité du pic d'hydratation augmente avec l'augmentation du pourcentage de la FS, ce qui met la lumière sur la contribution de la FS dans l'hydratation du ciment. En présence de PC-AV2, la FS s'approche plus de la courbe de tendance des cendres volantes.

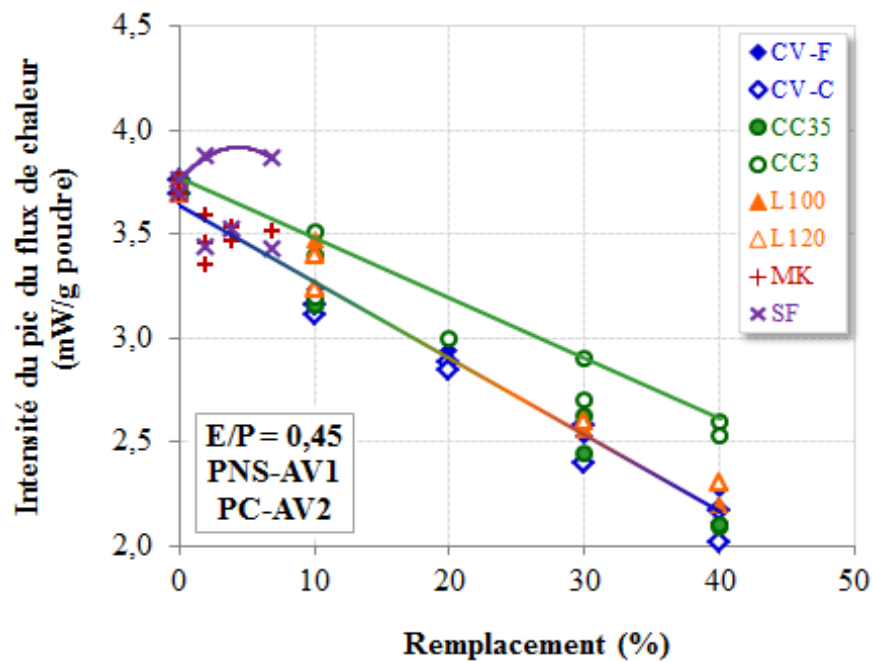


Figure 5.30 Effet du taux de remplacement des AM sur l'intensité du pic du flux de chaleur des MBE-AP

Tableau 5.1 Valeurs caractéristiques des courbes d'hydratation des MBE-AP

Composition	PNS				PC			
	t (q _{max}) (h)	q _{max} (W/kg poudres)	q _{max} (W/kg ciment)	Q _{40h} (J/g)	t (q _{max}) (h)	q _{max} (W/kg poudres)	q _{max} (W/kg ciment)	Q _{40h} (J/g)
REF	15,80	3,76	3,76	222	12,39	3,70	3,70	239
10% CV-F	15,60	3,19	3,54	203	13,45	3,24	3,60	215
20% CV-F	18,75	2,94	3,68	180	13,92	2,85	3,57	192
30% CV-F	19,41	2,53	3,62	162	14,82	2,39	3,42	165
40% CV-F	22,40*	2,11	3,52	137	21,76*	2,27	3,79	150
10% CV-C	17,70	3,11	3,45	196	13,80	3,16	3,51	204
20% CV-C	19,07	2,88	3,60	178	16,02	2,84	3,55	190
30% CV-C	24,83	2,58	3,68	146	16,90	2,40	3,43	164
40% CV-C	26,10	2,17	3,61	123	18,47	2,02	3,37	142
10% CC35	17,66	3,40	3,78	200	13,19	3,16	3,51	207
30% CC35	18,70	2,63	3,75	163	13,52	2,44	3,49	169
40% CC35	19,54	2,09	3,50	142	13,91	2,10	3,50	149
10% CC3	14,40	3,51	3,90	216	11,56	3,20	3,56	218
20% CC3	-	-	-	-	9,88	3,00	3,75	205
30% CC3	12,00	2,90	4,14	182	8,82	2,70	3,85	181
40% CC3	11,38	2,60	4,33	163	14,50*	2,53	4,22	164
10% L100	16,75	3,42	3,80	202	13,24	3,13	3,47	208
30% L100	-	-	-	-	13,61	2,56	3,66	179
40% L100	28,03*	2,54	4,23	140	-	-	-	-
50% L100	-	-	-	-	21,90*	2,14	4,29	141
10% L120	16,73	3,40	3,77	210	12,84	3,24	3,60	215
30% L120	-	-	-	-	13,05	2,60	3,70	182
40% L120	26,10*	2,80	4,67	158	-	-	-	-
50% L120	-	-	-	-	18,67*	2,44	4,90	154
2% MK	16,15	3,59	3,66	221	12,30	3,45	3,52	226
4% MK	18,76	3,53	3,68	219	11,83	3,46	3,60	223
7% MK	15,08	3,51	3,78	220	11,44	3,35	3,60	218
2% SF	14,30	3,87	3,95	224	12,30	3,44	3,51	223
4% SF	-	-	-	-	11,90	3,52	3,67	225
7% SF	11,65	3,86	4,14	235	11,50	3,43	3,69	221

q_{max}: intensité maximale du pic d'hydratation, t (q_{max}): temps correspondant au pic maximal, Q_{40h}: chaleur totale dégagée au bout de 40 h d'hydratation.

(*) La position de q_{max} se situe au troisième pic d'hydratation

5.2.2.2 Temps de prise

Des résultats antérieurs ont montré que la calorimétrie peut être utilisée pour estimer le temps de prise des matériaux à base de ciments [Sandberg et coll., 2007]. Par conséquent, le temps correspondant à la pente maximale du pic d'hydratation du ciment est considéré comme une indication du temps de prise finale. Les figures 5.31 et 32 présentent l'effet du remplacement partiel du ciment Portland par les AM et des fillers sur le temps de prise finale des MBE-AP.

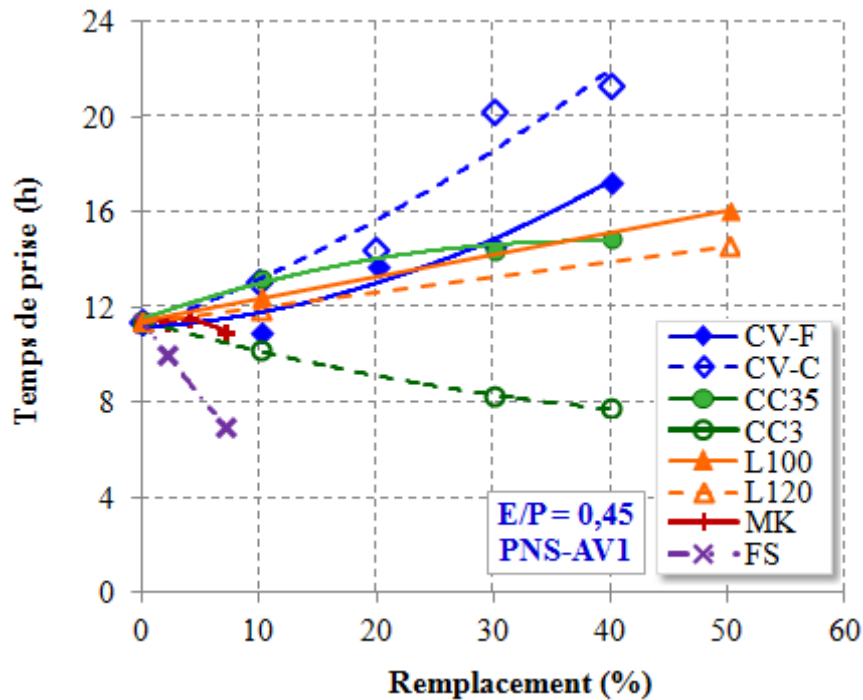


Figure 5.31 Effet des AM sur le temps de prise des MBE-AP en présence de PNS-AV1 (SP-AV fixes)

Les résultats montrent, généralement, que les AM et les fillers présentant une finesse très élevée, comme la FS, MK et CC3, ont un effet accélérateur sur l'hydratation du ciment. Bien que la FS et MK réagissent rapidement avec l'hydroxyde de calcium produit durant l'hydratation des phases silicates du ciment, il est encore admis que l'effet accélérateur de ces AM est lié plus à la présence des sites de nucléation additionnels pour la précipitation des produits d'hydratation [Thomas et coll., 2009; Bentz, 2006]. Ceci est plus évident dans le cas de la poudre calcaire finement broyée (CC3), qui de plus peut réagir légèrement dans les

systèmes cimentaires pour former monocarboaluminate. D'un autre côté le remplacement partiel du ciment Portland par des AM et des fillers dont la finesse est comparable ou plus grossière à celle du ciment Portland semble avoir un effet retardateur sur l'hydratation du ciment. Il faut noter que l'effet accélérateur et retardateur dans le cas des MBE-AP contenant PNS-AV1 est plus important que ceux observés dans les mélanges contenant PC-AV2.

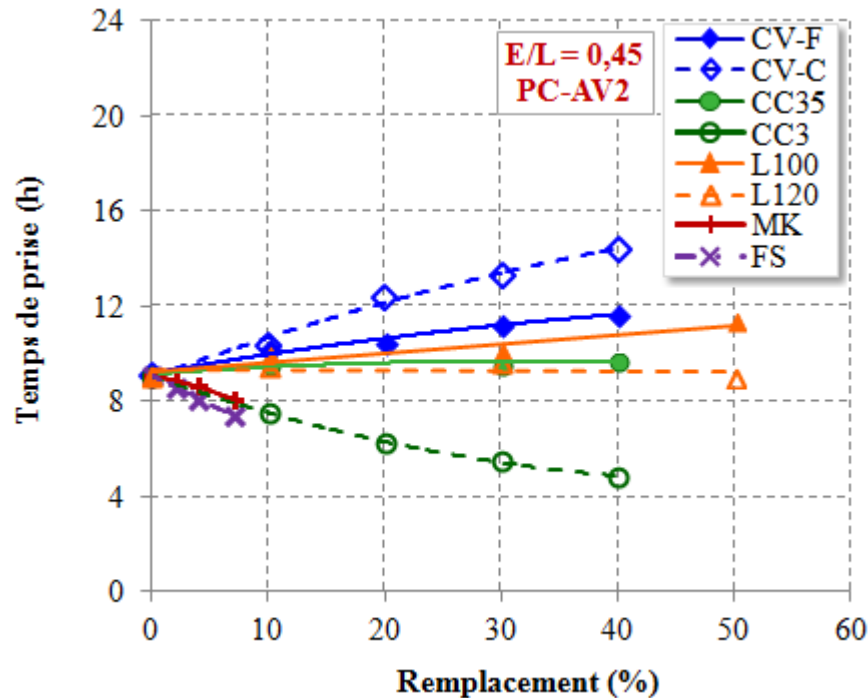


Figure 5.32 Effet des AM sur le temps de prise des MBE-AP en présence de PC-AV2 (SP-AV fixes)

5.2.2.3 Développement des résistances à la compression

L'effet du remplacement partiel du ciment par les AM sur le développement des résistances à la compression des MBE-AP à 1, 28 et 91 jours, pour les deux combinaisons SP-AV, sont présentés dans les figures 5.33 à 5.38.

Les résistances à la compression développées à 24 heures (f'_{ci}) sont présentées dans les figures 5.33 et 5.34. Les résultats montrent que, les MBE-AP contenant des AM et les fillers fins qui accélèrent l'hydratation du ciment présentent, généralement, un gain de résistance rapide à jeune âge par rapport aux mélanges de référence. Ceci est d'autant plus évident lorsque la

combinaison PNS-AV1 est utilisée (figure 5.33). En effet, une augmentation de f'_{c1} de 40% est notée avec les taux de remplacements de 2% de FS et 7% de MK, en présence de PNS-AV1. De plus, une augmentation significative de 32% de f'_{c1} est notée lorsque CC3 est utilisé à de faibles taux de remplacement en présence de PNS-AV1. Cependant, pour un taux de remplacement de 40% en CC3, f'_{c1} chute de 20%, en présence de PNS-AV1, ce qui est dû à la diminution de la teneur du ciment Portland. Avec la combinaison PC-AV2, les bénéfices d'une hydratation rapide due à la présence des AM et des fillers fins semble être contrebalancées par l'effet de dilution du ciment, particulièrement dans le cas de filler CC3 où diminution de 27% est noté avec juste 10% de remplacement.

Tel que prévu, le remplacement partiel du ciment Portland par les AM comme les CV, le laitier ou les fillers moins fins ont tendance à diminuer f'_{c1} où de faibles valeurs, inférieures à 6 MPa, sont obtenues en présence de PNS-AV1, avec des taux de remplacements supérieurs à : 20% de CV-C, 25% de CC35, 35% de L100 et 45% de L120.

À 28 jours, les MBE-AP avec la FS, pour les deux couples SP-AV, présentent des résistances en compression (f'_{c28}) 15% à 20% supérieurs à celle du mélange de référence. Par contre, le MK utilisé dans cette étude, semble qu'il n'a pas d'effet significatif positif sur f'_{c28} , quel que soit le couple SP-AV utilisé. Des valeurs de l'ordre de 44 ± 6 MPa et 63 ± 3 MPa sont trouvées avec PNS-AV1 et PC-AV2 respectivement. Par ailleurs, le remplacement partiel du ciment Portland par l'une des deux cendres volantes (CV-C ou CV-F) ou par le filler calcaire CC35 cause une diminution importante dans f'_{c28} . Toutefois, des taux de remplacement de 20% de CV-C, 20% CV-F ou 5% de CC35 sont très acceptables en présence de PNS-AV1 avec des $f'_{c28} \geq 40$ MPa. Pour ce même ordre de f'_{c28} , les taux de remplacement sont plus poussés en présence de PC-AV2 avec jusqu'à 40% de CV-C, 40% CV-F et 25% de CC35.

L'augmentation du taux de remplacement de 10% à 40% en CC3 a présenté une diminution des f'_{c28} jusqu'à 52% avec PC-AV2. Tandis qu'avec PNS-AV1, à 10% de remplacement une augmentation de 20% est notée puis au-delà de ce taux f'_{c28} diminue jusqu'à 45% par rapport au mélange de référence. Dans le cas des deux types de laitier, le taux de remplacement peut

être augmenté jusqu'à 50% sans impact négatif sur f'_{c28} , quel que soit le couple SP-AV (figure 5.35 et 5.36).

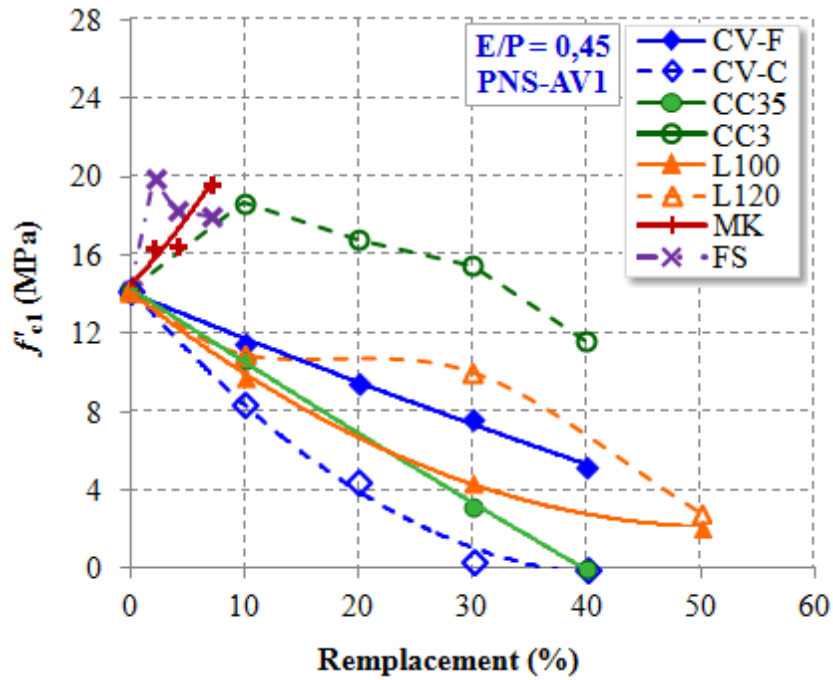


Figure 5.33 Effet des AM sur f'_{c1} en présence de PNS-AV1 (SP-AV fixes)

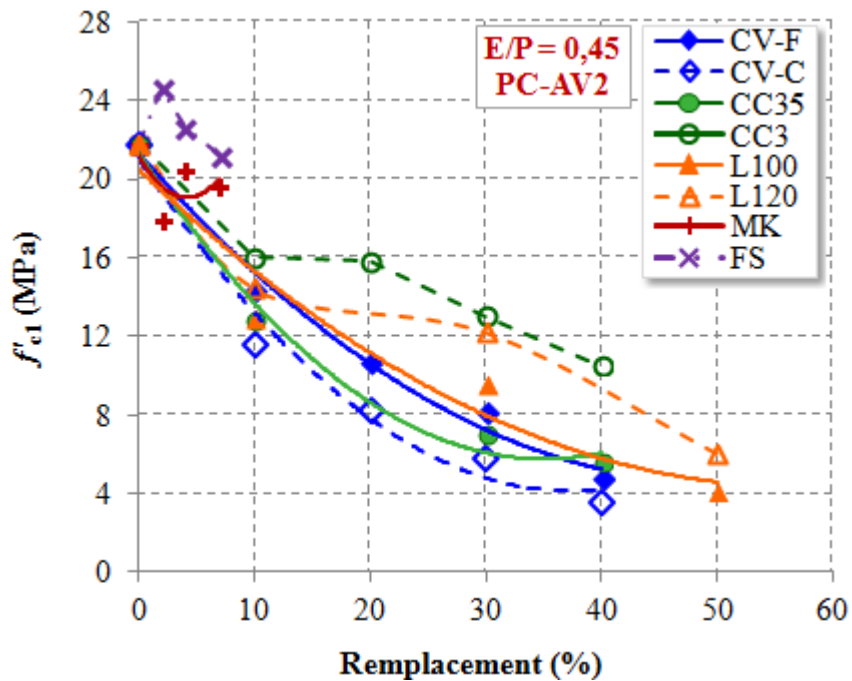


Figure 5.34 Effet des AM sur f'_{c1} en présence de PC-AV1 (SP-AV fixes)

À 91 jours, généralement les résistances des MBE-AP avec FS, L100 et L120 se rapprochent ou dépassent jusqu'à 10% la résistance des mélanges de référence. Les MBE-AP avec la CV-F et la CV-C ont eu un gain de résistance avec le temps, ce gain est plus important en présence de PC-AV2. En effet, les résistances sont supérieures à 60 MPa avec 40% de remplacement de CV-F ou de CV-C, en présence de PC-AV2. Tandis qu'avec PNS-AV1, les résistances sont supérieures à 40 MPa pour des remplacements de 40% de CV-F ou 30% CV-C. Les MBE-AP contenant le filler CC3 avec PNS-AV1, n'ont pas montré une augmentation des résistances par rapport aux résistances obtenues à 28 jours. Alors qu'avec PC-AV2 les résistances à 91 jours sont supérieures, jusqu'à 22%, des résistances obtenues à 28 Jours. L'hydratation des MBE-AP contenant CC35 continue de même, ce qui se traduit par une augmentation des résistances allant jusqu'à 18% par rapport aux résistances à 28 jours, quel que soit la combinaison SP-AV (figures 5.37 et 5.38).

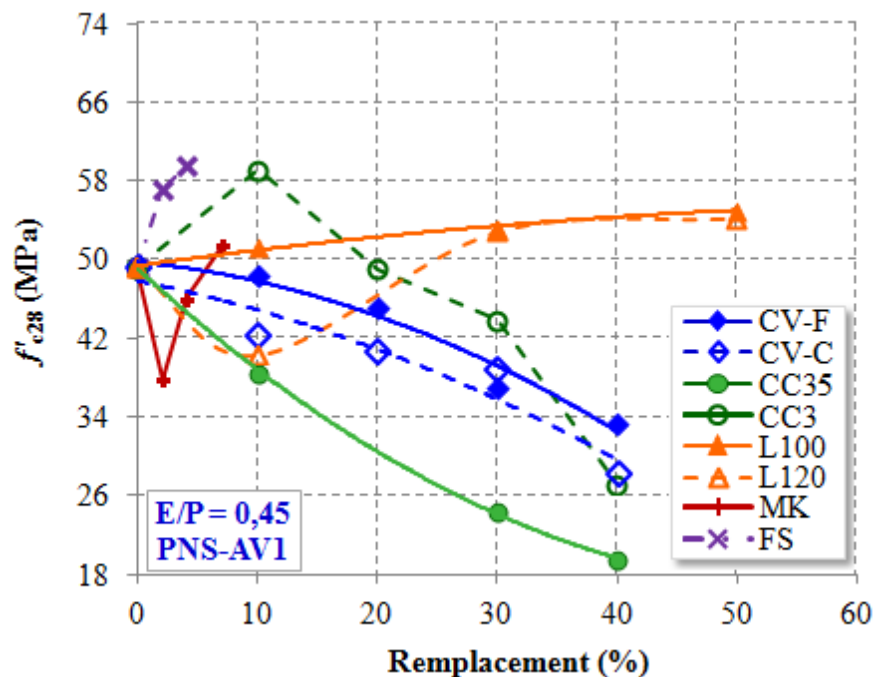


Figure 5.35 Effet des AM et des fillers en présence de PNS-AV1 sur la résistance à la compression à 28 jours

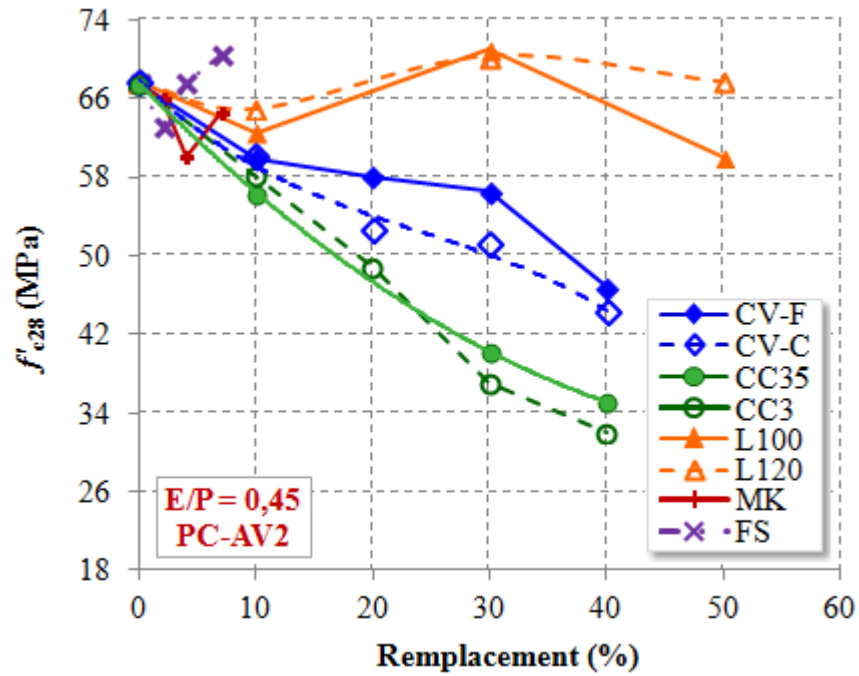


Figure 5.36 Effet des AM et des fillers en présence de PC-AV2 sur la résistance à la compression à 28 jours

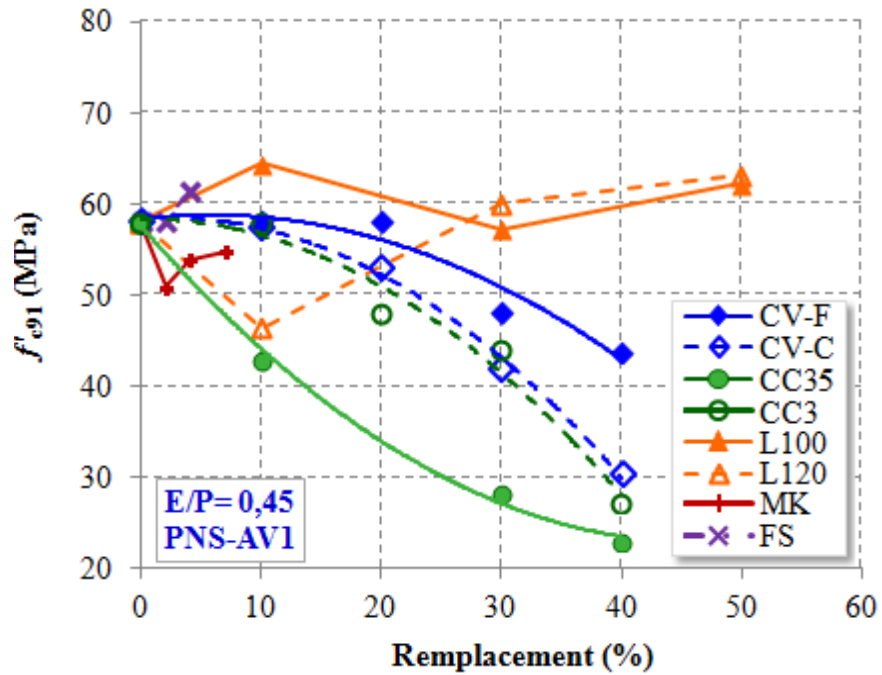


Figure 5.37 Effet des AM et des fillers en présence de PNS-AV1 sur la résistance à la compression à 91 jours

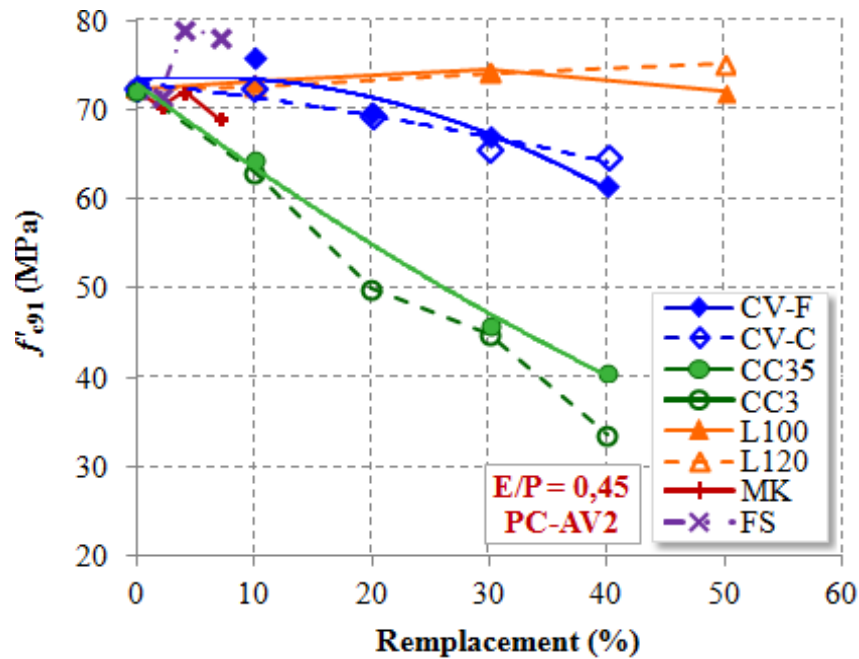


Figure 5.38 Effet des AM et des fillers en présence de PC-AV2 sur la résistance à la compression à 91 jours

5.2.2.4 Synthèse

Les résultats de l'effet du remplacement partiel du ciment par des AM, fillers et du type de la combinaison SP-AV sur le dégagement de chaleur et le développement des résistances ont montré que :

- Le type de la combinaison SP-AV, semble avoir un effet considérable sur le flux de chaleur des MBE-AP, et plus précisément sur la longueur de la période dormante qui est plus longue avec PNS-AV1.
- Le remplacement partiel du ciment par les ajouts minéraux tel que la CV-F, CV-C, CC35, L100 et L120 cause une augmentation dans la durée de la période dormante et une diminution dans l'amplitude du deuxième pic d'hydratation. Ces phénomènes sont dus à l'effet de dilution de ces ajouts et du fait que la réaction pozzolanique dégage moins de chaleur que la réaction d'hydratation du ciment.

- Le remplacement partiel du ciment par le filler CC3, MK et FS a pour effet de diminuer la durée de la période dormante et d'augmenter l'intensité du deuxième pic. Ce qui est attribué à l'effet efficace des sites de nucléation dans la stimulation de l'hydratation du ciment GU.
- L'utilisation de 10% à 30% du filler CC3 avec la combinaison PNS-AV1, a engendré une performance intéressante du point de vue résistance à la compression à 1 et 28 jours. Une performance qui n'est pas observée en présence de PC-AV2.
- Si la FS est considérée comme l'AM à réactivité élevée par excellence, grâce à ces performances sur les résistances à jeune âge ainsi qu'à long terme, ceci n'est pas évident dans le cas du MK. Le MK a présenté une réactivité remarquable à jeune âge et surtout en présence de PNS-AV1.
- L'utilisation de la combinaison PC-AV2, s'avère plus avantageuse du point de vue résistance à la compression. En effet, des taux de remplacement allant jusqu'à 40% de CV-C, 40% CV-F, 25% de CC35 et 50% de L100 et L120 peuvent être utilisés sans impact négatif sur les résistances à 28 jours.

5.3 EFFET DES AM ET DU TYPE DE SP SUR LES PROPRIÉTÉS DES MBE-SF

Dans cette section, l'étude se porte sur les bétons semi-fluides pour la construction des infrastructures de transport. Le MBE-SF de référence ainsi que les autres MBE correspondants à cette application sont préparés avec un rapport E/C de 0,41. Un étalement de 210 mm pour les MBE-SF de référence est obtenu avec l'ajout d'un SP. Deux types de SP sont étudiés (PNS et PC), dont les dosages sont gardés constants afin d'en tirer que l'effet des AM. Les bétons semi-fluides sont, généralement, assez stables et ne nécessitent pas l'utilisation d'un AV. Six AM sont introduits, à tour de rôle, en substitution massique du ciment à des taux croissants. 10% à 40% pour les deux types de cendres volantes (CV-F et CV-C), 10% à 50% pour les deux laitiers (L100 et L120), 2% à 7% pour la FS et 2% à 15% pour le MK. Les formulations de tous les MBE-SF (PNS et PC) sont les mêmes que celles des MBESF de référence

représentée sur le tableau 4.9 où la différence réside dans le remplacement massique du ciment par les différents pourcentages en AM.

Pour les différents MBE, les propriétés rhéologiques sont mesurées à 10, 30 et 60 min, la chaleur d'hydratation est suivie jusqu'à 40 heures d'hydratation et les résistances à la compression sont fait à 1, 28 et 56 jours.

5.3.1 Effet des AM et du type de SP sur les propriétés rhéologiques et la stabilité des MBE-SF

5.3.1.1 Effet sur la fluidité

Comme pour les MBE-AP, la fluidité des MBE-SF avec différents taux de remplacement en AM est évaluée en déterminant l'étalement au mini cône et le seuil de cisaillement moyennant le viscosimètre à cylindres coaxiaux ConTec 6. Selon le type de SP, le diamètre moyen de l'étalement et le seuil de cisaillement des MBE-SF binaires sont montrés dans les figures 5.39-5.42. Les résultats de l'étalement concordent bien avec ceux du seuil de cisaillement, d'où la discussion des résultats est basée sur les variations du seuil de cisaillement.

L'augmentation du taux de remplacement du ciment par la FS (de 2% à 7%) ou par le MK (de 2% à 15%) a engendré une importante augmentation du seuil de cisaillement des MBE-SF, pour les deux types de SP étudiés. Par exemple, le seuil de cisaillement est 2 fois plus important que celui du MBE-SF de référence avec juste 2% de FS ou de 7% de MK et en présence du PNS. Pour ces mêmes pourcentages et en présence du PC, le seuil de cisaillement est de 3 et 4 fois plus importante en comparaison avec le MBE-SF de référence correspondant. La présence des poudres fines a augmenté la surface spécifique des particules de la matrice cimentaire et avec le caractère semi-fluide des mélanges de référence, ceci a dégradé considérablement la fluidité des MBE-SF.

Généralement, la substitution massique du ciment par des AM ayant une finesse comparable ou un peu plus élevée que celle du ciment GU, comme la CV-C, L100, ou le L120, a réduit le seuil de cisaillement des MBE-SF. Ce qui est dû au fait que les SP s'adsorbe moins à genre de particules laissant ainsi plus de SP pour disperser les particules de ciment [Palacios et coll.,

2012]. La diminution du seuil de cisaillement semble plus significative en présence du PC. En effet, le remplacement de 50% de ciment par L120 ou L100 ou encore 40% de CV-C conduit à une diminution du seuil de cisaillement de l'ordre de 93%, 95 % et 100%, respectivement, en présence du PC. Alors qu'avec le PNS, L'utilisation de 50% de L100 ou 40% de CV-C engendre, respectivement, une diminution de 50% et 80% du seuil par rapport au mélange de référence.

La présence de 10% de CV-F a engendré une augmentation du seuil de cisaillement de l'ordre de 40% et 58% en présence de PNS et PC, respectivement. Au-delà de 10% de remplacement le seuil diminue, mais la diminution n'est pas significative et les MBE demeurent dans le domaine semi-fluide.

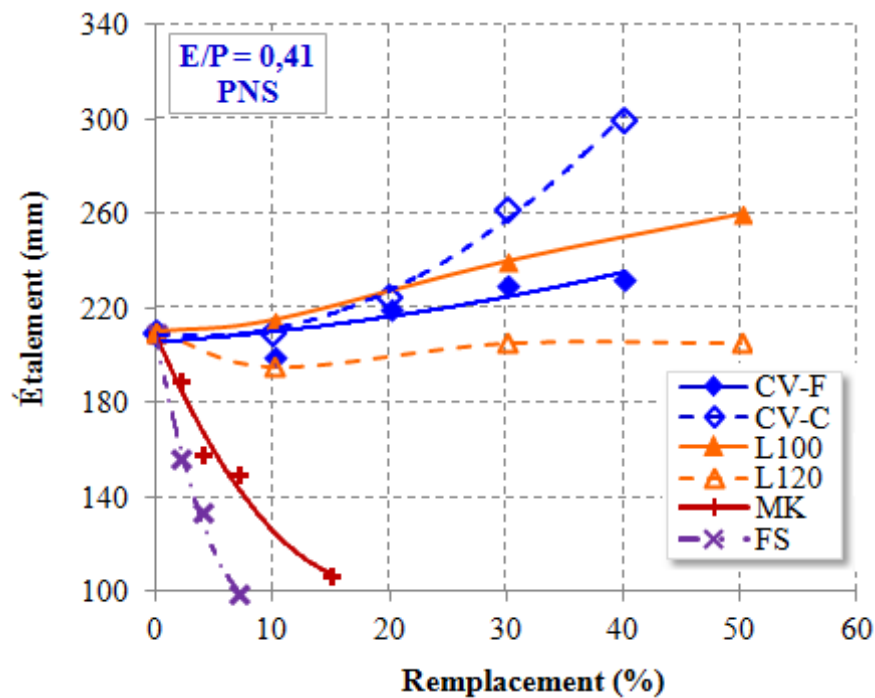


Figure 5.39 Étalement à 10 min des MBE-SF avec différents pourcentage d'AM en présence du PNS (SP fixe)

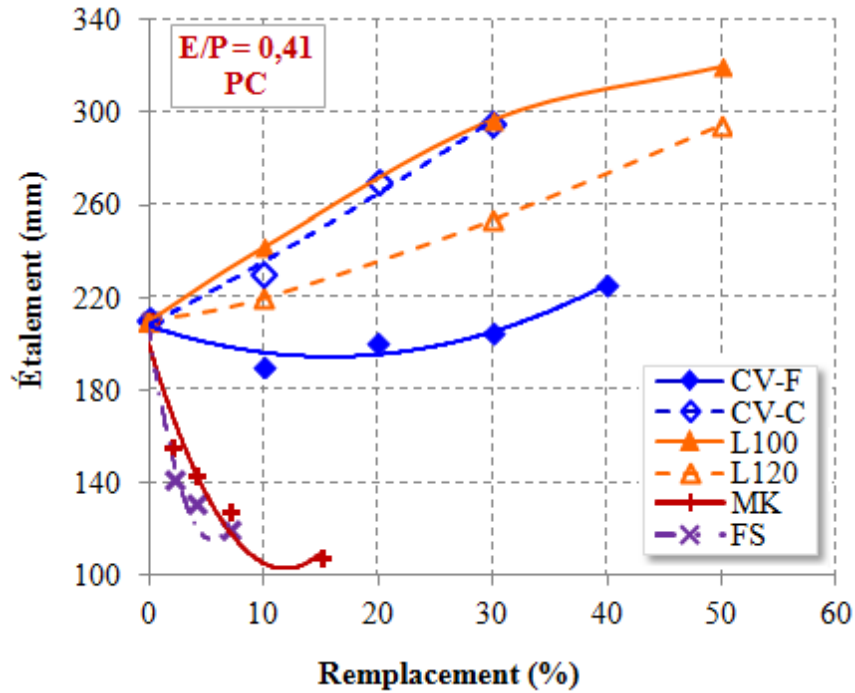


Figure 5.40 Étalement à 10 min des MBE-SF avec différents pourcentage d'AM en présence du PC (SP fixe)

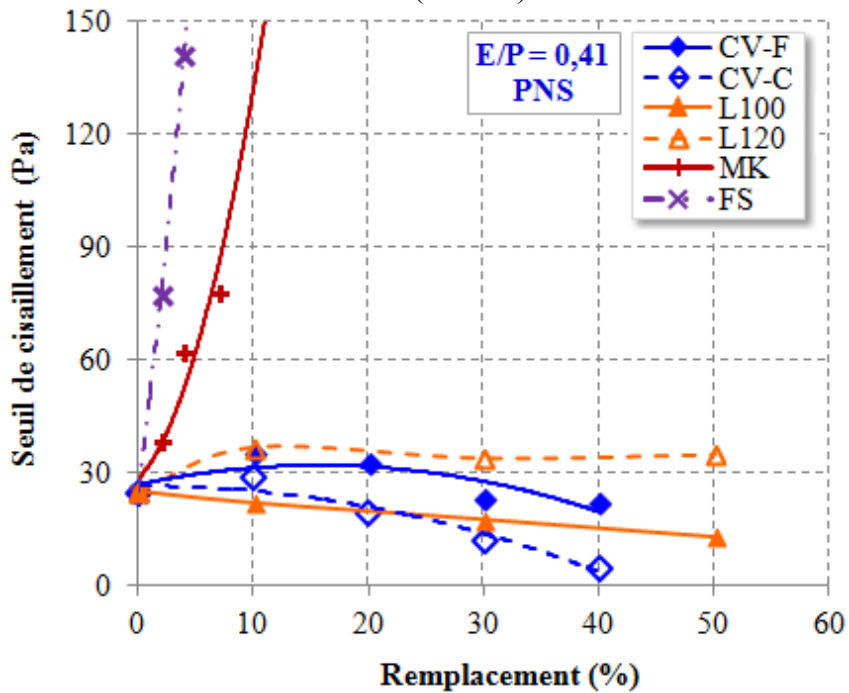


Figure 5.41 Seuil de cisaillement à 10 min des MBE-SF avec différents pourcentages d'AM en présence du PNS (SP fixe)

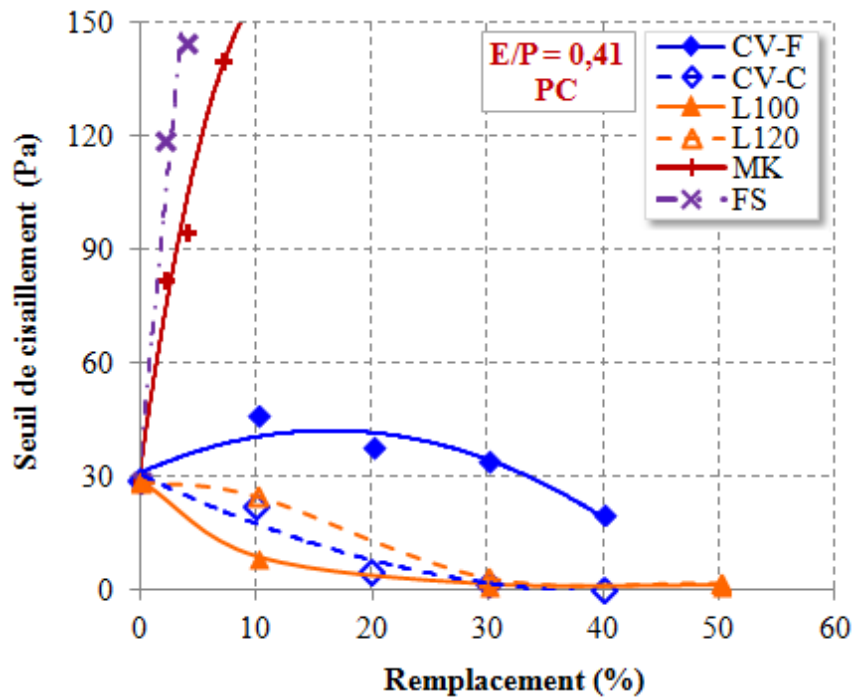


Figure 5.42 Seuil de cisaillement à 10 min des MBE-SF avec différents pourcentages d'AM en présence du PC (SP fixe)

5.3.1.2 Effet la viscosité plastique et le temps d'écoulement à travers V-funnel

La résistance à l'écoulement des MBE-SF contenant les différents dosages en AM est évaluée en déterminant le temps d'écoulement à travers l'entonnoir en V et que la viscosité plastique via le viscosimètre à cylindres coaxiaux ConTec 6. Dépendamment le type de SP (PNS ou PC) utilisé, le temps d'écoulement à travers l'entonnoir en V et la viscosité plastique des MBE-SF binaires sont représenté dans les figures 5.43 - 5.46. Une relation linéaire est trouvé entre le temps d'écoulement à travers l'entonnoir en V et la viscosité plastique des MBE (§5.3), de ce fait et afin d'alléger le texte, la discussion des résultats est basée principalement sur les variations dans la viscosité plastique des MBE-SF.

Les MBE-SF de référence en présence de PNS ou PC présentent des viscosités plastiques très semblables, ce qui signifie que le type de SP utilisé n'a pas d'effet sur la viscosité plastique. L'augmentation du taux de remplacement du ciment par des particules sphériques de la CV-C

ou de la FS diminuent la viscosité plastique des MBE-SF, quel que le type de SP utilisé. La diminution la plus importante est notée en présence de PNS et avec 40% de CV-C ou 4% de FS, où la viscosité plastique a diminué de 40% et 30% respectivement. De l'autre côté, l'augmentation du taux de remplacement du ciment par la CV-F ne semble pas avoir un effet notable sur la viscosité plastique des MBE-SF, quel que soit le type de SP utilisé.

Comme il est noté dans le cas des MBE-AP, la substitution du ciment par des particules semi-angulaires du MK augmente considérablement la viscosité plastique. En effet, un remplacement partiel du ciment par MK allant jusqu'à 7% entraîne une augmentation de la viscosité plastique jusqu'à 40% et 55% en présence du PNS et PC, respectivement. À 15% de MK en présence de PC, les mesures rhéologiques n'étaient pas possible à cause de la fluidité du mélange qui était très faible.

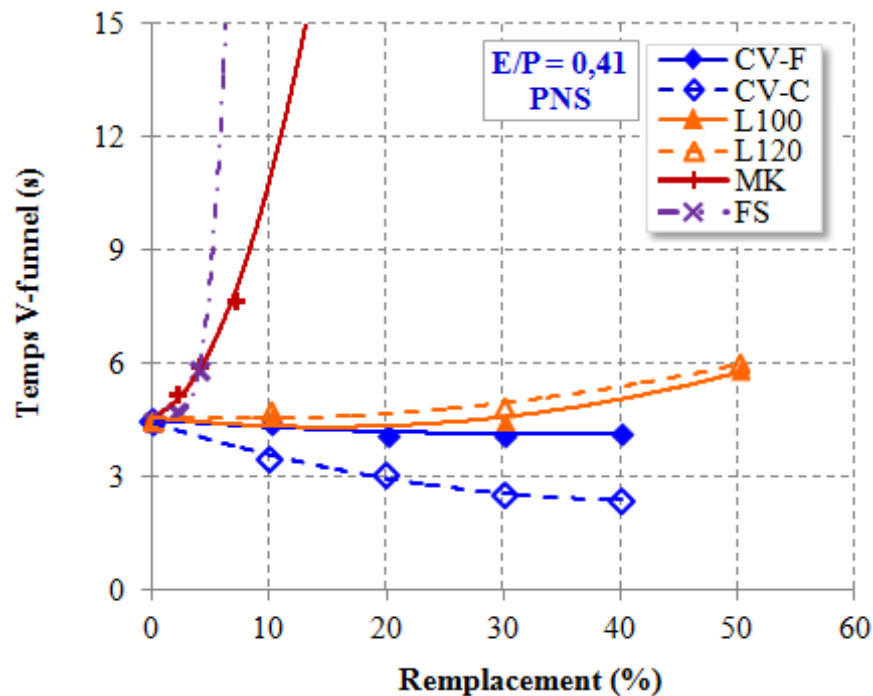


Figure 5.43 Temps d'écoulement à travers V-funnel à 10 min des MBE-SF avec différents pourcentages d'AM et en présence du PNS (SP fixe)

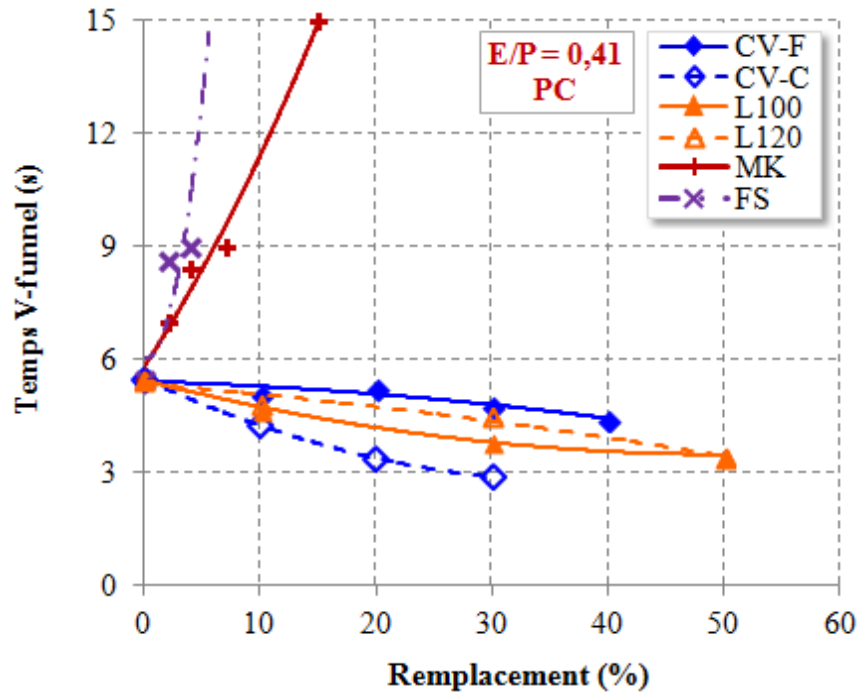


Figure 5.44 Variation du temps d'écoulement à travers V-funnel des MBE-SF avec différents dosages d'AM et en présence du PC (SP fixe)

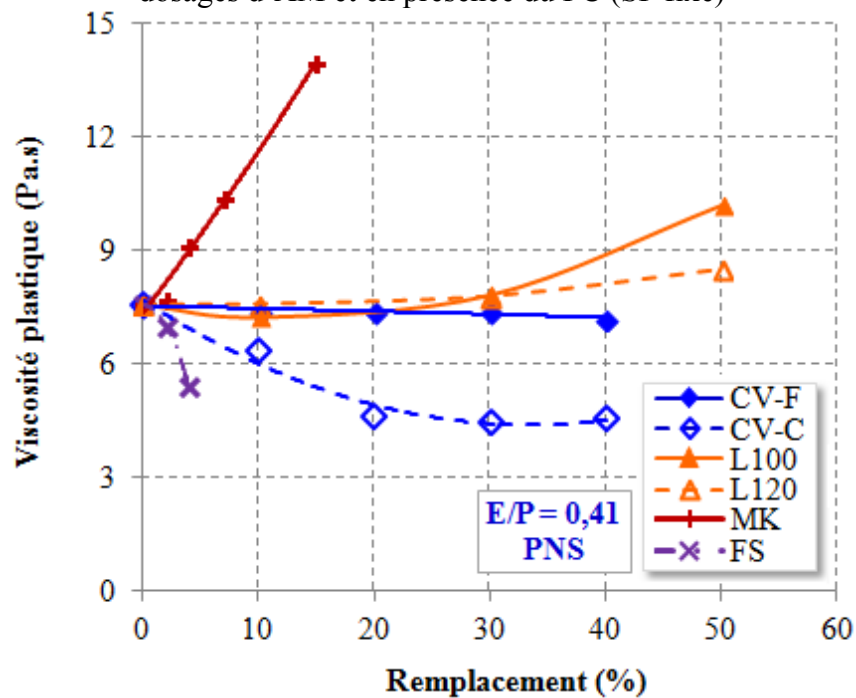


Figure 5.45 Variation de la viscosité plastique des MBE-SF avec différents dosages d'AM et en présence du PNS (SP fixe)

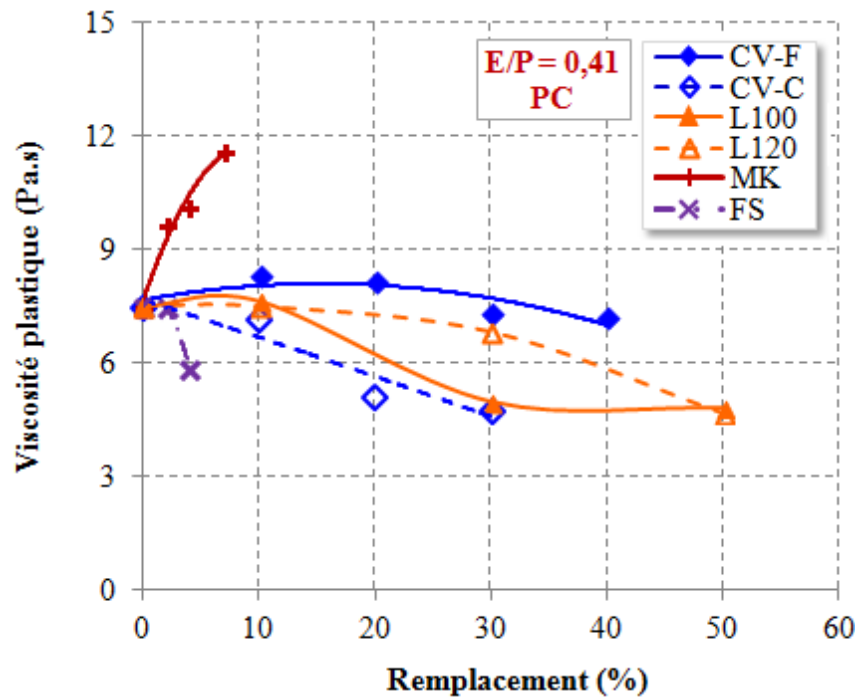


Figure 5.46 Variation de la viscosité plastique des MBE-SF avec différents dosages d'AM et en présence du PC (SP fixe)

L'effet des particules angulaires allongées du laitier (L100 ou L120) sur la viscosité plastique des MBE-SF dépend du type de SP utilisé. En effet, l'utilisation de 50% du L100 ou L120, avec PNS, a engendré une augmentation de la viscosité plastique de 35% ou 13%, respectivement, par rapport au MBE-SF de référence (figures 5.45 et 5.46). Alors qu'en présence de PC, pour le même pourcentage de remplacement la viscosité a diminué de 36% ou 38% avec L100 ou L120. Encore une fois, l'efficacité du SP utilisé à disperser les AM joue un rôle important dans la détermination des propriétés rhéologiques des mortiers. Les mélanges contenant l'un des deux laitiers (L100 ou L120) en présence du PNS présentent une consistance semi-fluide et l'augmentation de la teneur en particules angulaires du laitier accroît la friction entre les particulaires et par conséquent la viscosité du milieu augmente. Par contre avec PC, les mélanges présentent une fluidité très élevée, ce qui diminue la friction entre les particules et donc la viscosité plastique du milieu a diminué.

5.3.1.3 Effet sur la rétention de fluidité

Vu l'importance du maintien de l'ouvrabilité en fonction du temps, les propriétés rhéologiques des MBE-SF, contenant différents AM avec chacun des deux types de SP, sont suivies jusqu'à 60 min. Il est important de noter que les mélanges contenant des AM minéraux qui ont tendance à augmenter le seuil de cisaillement avec le temps, ont présenté des seuils de cisaillement tellement importants, que la fiabilité des mesures du seuil et de la viscosité plastique est mise en péril. De même, les mesures du temps d'écoulement à travers le V-funnel étaient impossibles, pour certains mélanges, à cause du blocage lors de l'écoulement. De ces faits, seules les mesures de l'étalement au mini-cône sont prises en considération pour la rétention de la fluidité. Il faut rappeler que, dans toute l'étude menée dans la section 5.2, le dosage initial du SP était ajusté pour les mélanges de référence pour avoir une consistance semi-fluide (étalements de 210 ± 10 mm). Ce dosage était maintenu constant pour tous les mélanges où les taux de remplacement des AM sont variés.

Le tableau 5.1 récapitule les mesures d'étalement au mini cône effectuées à 10, 30 et 60 min. Les résultats montrent que, généralement, la rétention de l'étalement est améliorée avec l'augmentation du taux de remplacement en AM à faible réactivité, comme les cendres volantes et les deux laitiers. Ceci est d'autant plus apparent lorsque le PC est utilisé. Par exemple, l'utilisation de 20% CV-F en présence de PC a présenté un meilleur maintien de l'étalement en comparaison avec PNS. De plus, les mélanges contenant de faibles taux de remplacement de ciment en présence de PC ont présenté une meilleure rétention de la fluidité en comparaison aux mélanges contenant des taux de remplacement plus élevés en présence de PNS. Par exemple, les MBE-SF contenant 10% de L100 ou 10% de L120 en présence de PC ont présenté une perte de l'étalement deux fois moins importante que les MBE-SF contenant 30% de L100 ou 30% L120 avec PNS (figure 5.47). Ceci est dû principalement au pouvoir des PC à maintenir la fluidité des systèmes cimentaires. Pour les mélanges contenant MK et FS, l'étalement initial est très affecté par les particules très fines de ces AM, ce qui se répercute encore plus sur les résultats de la rétention de la fluidité.

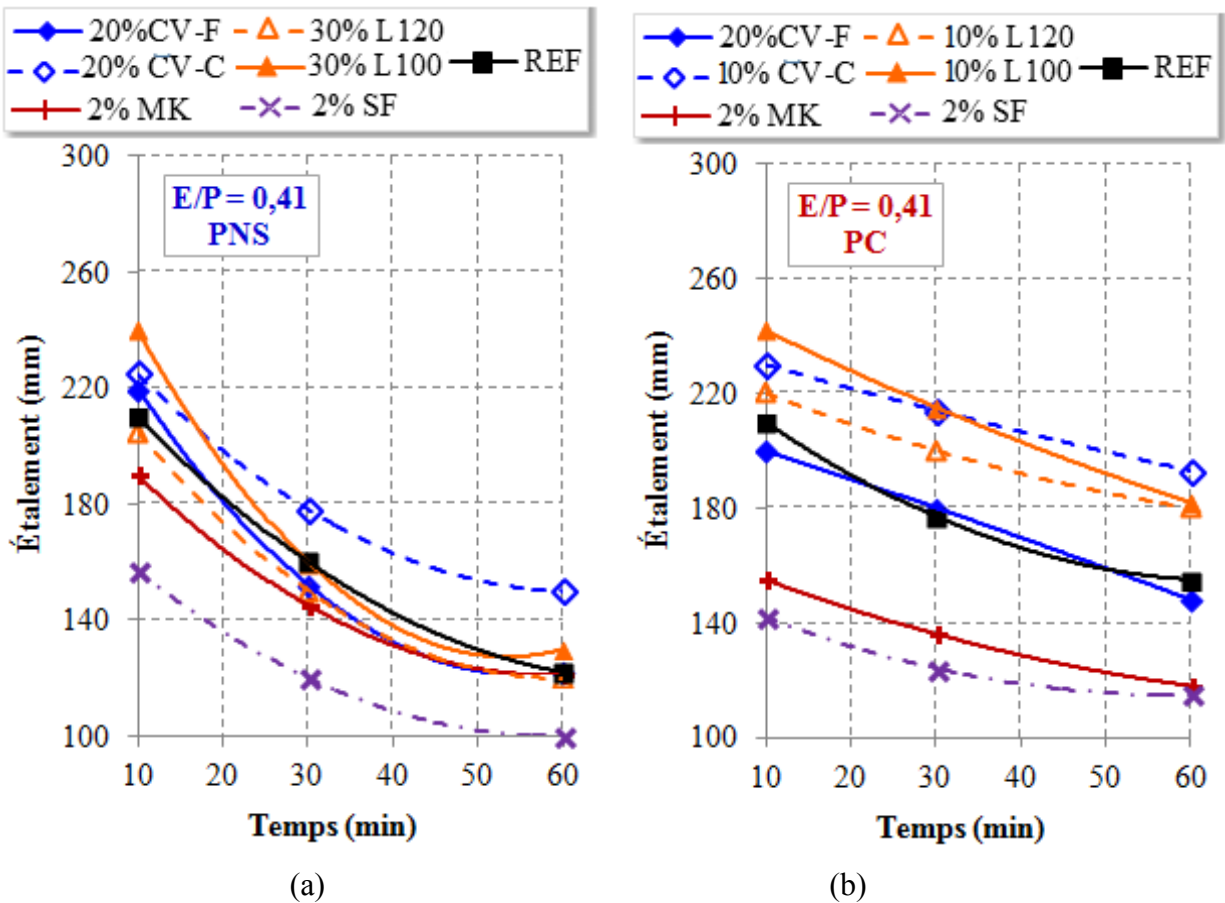


Figure 5.47 Évolution de l'étalement jusqu'à 60 min pour différents taux de remplacement en AM avec: a) PNS, b) PC (SP fixe)

5.3.1.4 Effet des AM et du type de SP sur la stabilité des MBE-SF

L'effet des AM sur le ressuage forcé des MBE-SF est présenté sur les figures 5.48 et 5.49. Les résultats montrent que, peu importe le type de SP utilisé, le remplacement partiel du ciment par les AM à faible réactivité ou par MK semble ne pas avoir un effet significatif sur la résistance au ressuage forcé des MBE-SF. Toute fois une diminution importante du ressuage forcé est notée avec 50% L100 et 50% L120 en présence de PC. Ces résultats ne sont pas un indice d'une amélioration de la stabilité, bien au contraire. Ces mélanges ont présentés une fluidité élevée et une grande instabilité qui ont conduit à la formation d'un bouchon au fond du dispositif empêchant ainsi le passage de l'eau. Par ailleurs, l'augmentation du taux de remplacement en FS de 0% à 7% résulte en une diminution du ressuage forcé de 4% à 2,3% et

de 3,8% à 2,2% en présence de PNS et PC respectivement. Il est à noter que le type de SP (PNS ou PC) n'a pas une influence sur le ressuage forcé sauf dans le cas des mélanges qui ont présenté une instabilité visible.

Tableau 5.2 Récapitulation des mesures d'étalement en fonction du temps

		Étalement (mm)					
		PNS			PC		
AM	%	10 min	30 min	60 min	10 min	30 min	60 min
REF	0	210	160	122	210	177	155
CV-F	10	200	149	120	190	175	152
	20	220	152	122	200	180	148
	30	230	172	135	205	175	160
	40	232	175	138	225	205	175
CV-C	10	210	160	140	230	214	193
	20	225	178	150	270	250	225
	30	262	208	175	295	278	260
	40	300	270	210	-	-	-
L100	10	215	150	122	242	215	182
	30	240	160	130	297	285	253
	50	260	152	115	320	300	290
L120	10	195	132	113	220	200	180
	30	205	150	120	254	232	200
	50	205	137	117	295	273	247
MK	2	190	145	121	155	136	118
	4	159	130	108	143	123	113
	7	150	120	105	128	110	110
	15	107	105	100 *	108	100 *	100 *
FS	2	157	120	100 *	142	124	115
	4	134	100 *	100 *	131	115	110
	7	100 *	100 *	100 *	120	110	110

AM : Ajout minéral, * Pas d'étalement.

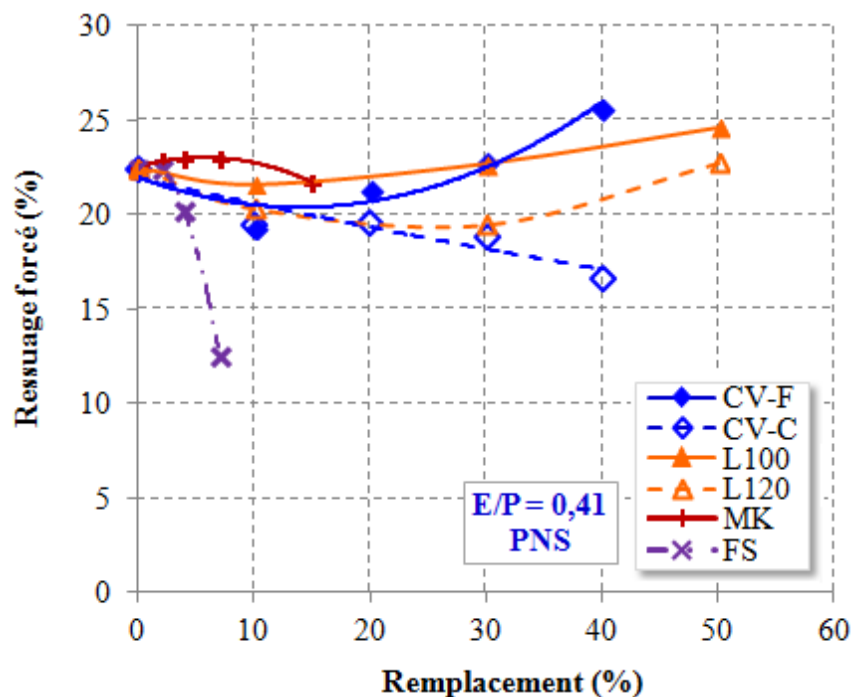


Figure 5.48 Effet du taux de remplacement d'AM sur le ressuage forcé des MBE-SF en présence de PNS (SP fixe)

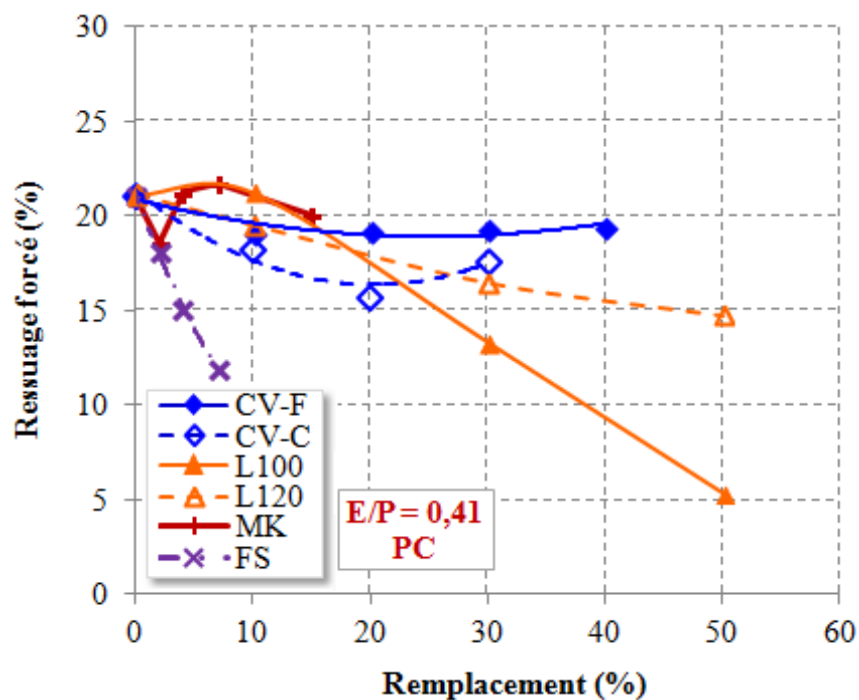


Figure 5.49 Effet du taux de remplacement d'AM sur le ressuage forcé des MBE-SF en présence de PC (SP fixe)

5.3.1.5 Synthèse

- Les propriétés rhéologiques des MBE-SF sont influencées par le type de SP utilisé, plus spécifiquement le seuil de cisaillement. En effet, l'effet des AM sur le seuil de cisaillement est plus significatif en présence du PC qu'en présence de PNS
- L'utilisation de la CV-C, L100 et le L120 semble avoir un effet bénéfique sur la fluidité des MBE-SF, surtout en présence du PC.
- L'utilisation de la FS et du MK engendre une augmentation considérable dans le seuil de cisaillement des MBE-SF.
- Le type de SP semble affecter la viscosité plastique des MBE-SF contenant l'un des deux laitiers. La viscosité plastique augmente avec l'augmentation du taux de remplacement en laitier en présence du PNS. Alors qu'en présence du PC, la viscosité a diminué.
- Il est clair que l'utilisation du MK engendre une augmentation significative dans la viscosité plastique des MBE-SF. Alors que la FS diminue la viscosité mais de façon moins significative.
- L'utilisation de la CV-F ne semble pas avoir un effet notable sur la viscosité plastique des MBE-SF quel que soit le type de SP utilisé.
- Les MBE-SF en présence du PC ont présenté un meilleur maintien de la fluidité en comparaison avec ceux en présence de PNS.
- Le test du ressuage forcé peut être utilisé afin de comparer la contribution des AM et des fillers dans la capacité à améliorer la rétention de l'eau dans le mélange et ne peut être utilisé à titre définitif de la stabilité.

5.3.2 Effet des AM et du type de SP sur l'hydratation et le développement des résistances des MBE-SF

5.3.2.1 Dégagement de chaleur

L'effet des AM sur le dégagement de chaleur des MBE-SF est suivi par le calorimètre isotherme, TAM Air, décrit dans le chapitre 3. Le dégagement de la chaleur au cours des

premières 48 d'hydratation des MBE-SF, contenant différents taux de remplacement en AM avec l'utilisation de SP à base de PNS ou PC, sont présentés dans les figures 5.50 à 5.62. Évidemment, le dosage en SP est maintenu constant pour tous les mélanges. Comme il a été déjà mentionné dans le paragraphe 5.1.2.1, le premier pic dans le dégagement de chaleur, qui est causé principalement par l'humidification et la réaction du C_3A avec le gypse, n'est mesuré à cause du malaxage qui a eu lieu à l'extérieur du calorimètre.

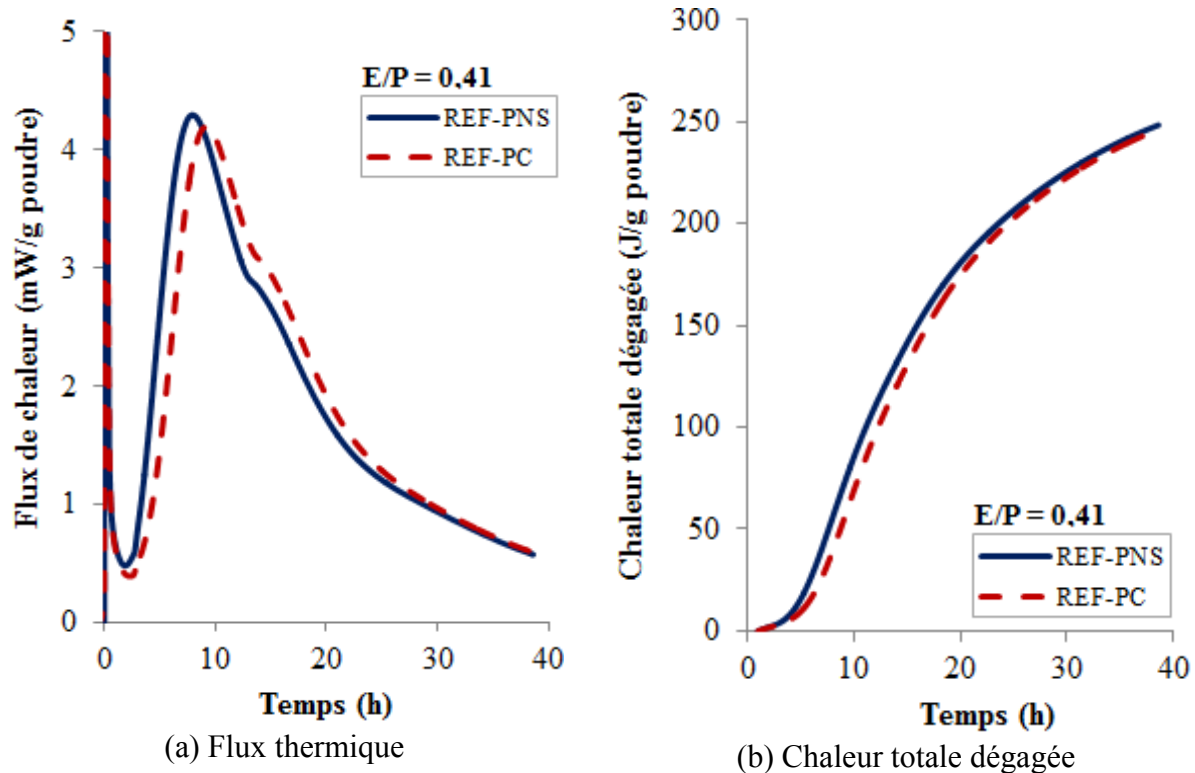


Figure 5.50 Effet du type de SP sur la chaleur dégagée des MBE-SF

Le flux thermique et la chaleur totale dégagée des mélanges de référence (REF-PNS et REF-PC) sont présentés dans la figure 5.50. La durée de la période dormante des mélanges de référence, durant laquelle le processus d'hydratation est très faible, n'est pas influencée par le type de SP utilisé. En effet, les deux mélanges références ont présenté des durées de période dormantes très semblables de 2 h et 2,3 h pour REF-PNS et REF-PC, respectivement. Après la période dormante, la chaleur d'hydratation augmente rapidement dû à l'hydratation du C_3S pour atteindre un deuxième pic d'hydratation. La montée du flux de chaleur est relativement

plus rapide pour le mélange REF-PNS en comparaison avec celle du REF-PC, mais l'intensité des deux pics est très semblable. De plus, la chaleur totale dégagée par des deux mélanges est presque identique. Le troisième pic d'hydratation correspondant à la transformation de l'ettringite en monosulfate d'alumine ainsi qu'à la reprise d'hydratation du C_3A se présente, pour les deux mélanges (REF-PNS et REF-PC) sous forme d'une petite bosse dans la courbe du flux de chaleur.

Les figures 5.51 et 5.52 montrent l'influence du taux de remplacement de la CV-F sur la chaleur d'hydratation des MBE-SF en présence de PNS et PC, respectivement. Les figures indiquent que l'augmentation du taux de remplacement de la CV-F diminue légèrement la durée de la période dormante avec une diminution de la chaleur dégagée lors de cette période. À 40% de remplacement de CV-F, la durée de la période dormante est prolongée de 42 min et 49 min en présence du PNS et du PC, respectivement, par rapport à celle des mélanges de référence. Il est clair que, le deuxième pic d'hydratation a diminué significativement par l'augmentation du taux de remplacement de la CV-F, son intensité passe de 4,29 à 2,57 mW/g_{liant} pour 0% à 40% de remplacement en présence de PNS et de 4,19 à 2,39 mW/g_{liant} en présence de PC. Ceci est normal dû au remplacement du ciment par matériau à faible réactivité. De plus, l'augmentation du pourcentage de la CV-F a entraîné un prolongement du temps correspondant au troisième pic d'hydratation avec l'augmentation de la durée de l'amplitude de ce dernier, quel que soit le type de SP utilisé.

De même pour la CV-C, un remplacement de 30% et 40% en présence du PC et du PNS, respectivement, engendrent une prolongation de la période dormante de 42 min et 66 min par rapport aux mélanges de référence (Figures 5.53 et 5.54). Pour les deux type de SP, le dégagement de chaleur produit avec la présence de la CV-C est très comparable à celui obtenu avec la CV-F, sauf un léger prolongement dans le temps correspondant au deuxième pic noté au-delà de 20% de CV-C et en présence de PNS (tableau 5.3). Quant au troisième pic d'hydratation, son intensité et le temps correspondant sont aussi influencé par le pourcentage de la CV-C. Ce pic devient plus apparent à 40% de remplacement. De plus, ces résultats montrent que la cinétique d'hydratation en présence de la cendre volante est influencée plus

par le taux de la cendre que par le type la cendre utilisé. Par ailleurs, les résultats du flux de chaleur calculé par gramme de ciment indiquent que la présence de chacune des deux cendres ainsi que l'augmentation du taux de remplacement n'a pas un grand effet retardateur de l'hydratation du ciment. La plus grande diminution est notée avec 40% de CV-F et en présence de PC, où une diminution de 8% est notée pour le deuxième pic d'hydratation.

Le remplacement partiel du ciment par le laitier L100 n'a apparemment pas d'effet significatif sur la durée de la période dormante, quel que soit le type de SP utilisé (figures 5.55 et 5.56). Cependant, la chaleur dégagée lors de la période dormante semble diminuée avec l'augmentation du pourcentage de L100. À 50% de L100, la chaleur dégagée pendant la période dormante, en présence du PNS, a diminué de 35% par rapport à celle du mélange de référence. L'intensité du deuxième pic a aussi diminué par la présence du L100, une diminution allant jusqu'à 50% est noté avec 50% de L100 et pour les deux SP. Alors que l'intensité du deuxième pic reportée par rapport à la masse du ciment indique qu'à cet âge, le laitier n'a aucune contribution dans la chaleur dégagée par le ciment (tableau 5.3). De plus, l'augmentation du pourcentage de L100 n'a pas un effet significatif sur le temps correspondant au deuxième pic. Quant au troisième pic, il devient plus apparent et plus étendu à 50% de remplacement en L100. Semblablement au laitier L100, le remplacement partiel du ciment par un laitier plus fin qui est le L120, n'a pas d'effet significatif sur la période de la période dormante, mais la chaleur dégagée pendant cette période a diminué de 30% avec 50% de L120, en présence du PNS. Le deuxième pic semble aussi influencé par le pourcentage du L120, pour 50% de L120 une diminution de 50% de ce pic est notée avec le deux types de SP. Par ailleurs, le troisième pic augmente considérablement avec l'augmentation du L120 où son amplitude peut même dépasser celle du deuxième pic. Ceci a été observé pour les deux types de SP et pour un taux de 50% de L120 (figures 5.57 et 5.58). Ce pic correspond à la réaction du laitier qui prend lieu lorsque l'hydratation du ciment Portland a libéré une quantité suffisante de CH. Comme il a été noté pour les cendres volantes, la chaleur totale dégagée par les MBE-SF semble être affectée plus par l'augmentation du taux de remplacement du laitier que par les caractéristiques physiques du laitier ou du type de SP utilisé.

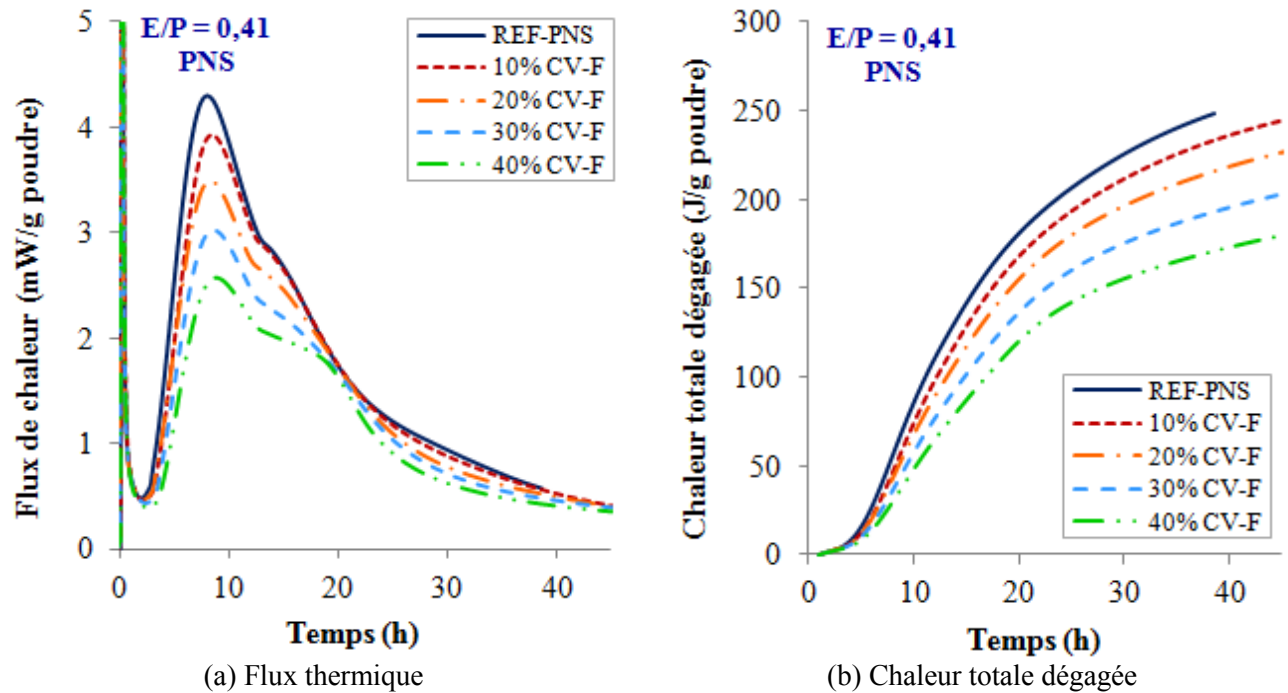


Figure 5.51 Effet du taux de remplacement de la CV-F sur la chaleur d'hydratation des MBE-SF en présence du PNS (SP fixe)

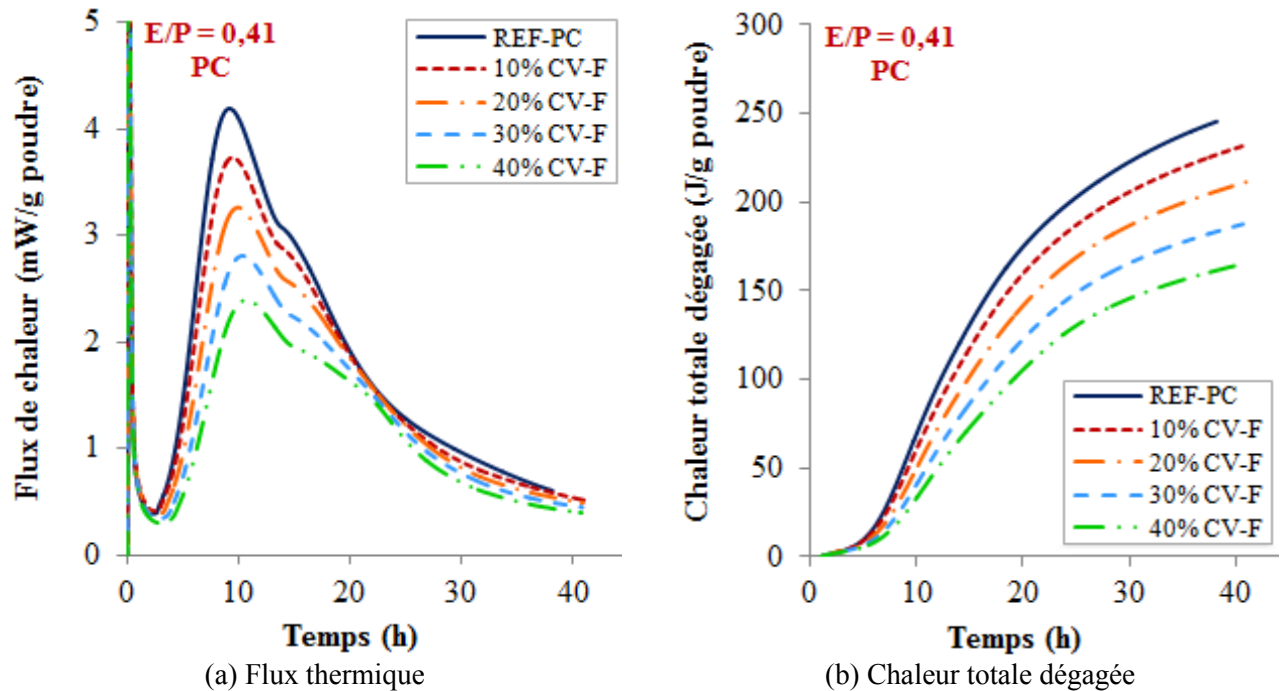


Figure 5.52 Effet du taux de remplacement de la CV-F sur la chaleur d'hydratation des MBE-SF en présence du PC (SP fixe)

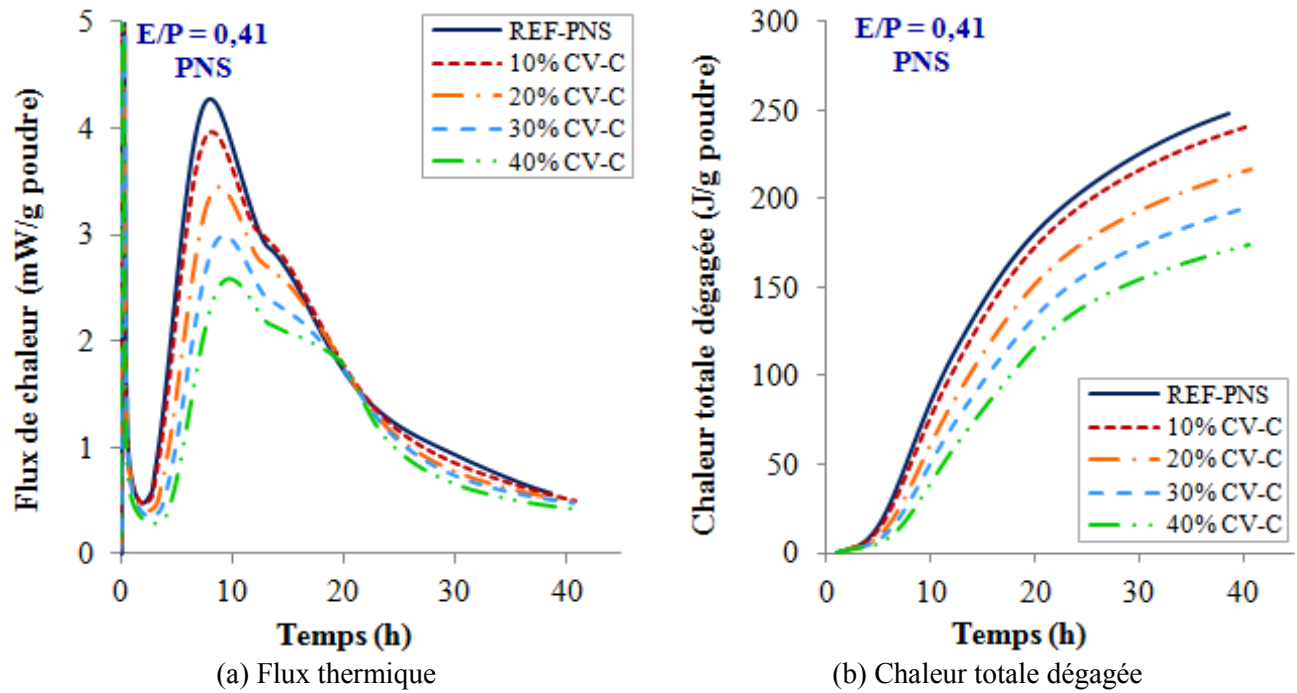


Figure 5.53 Effet du taux de remplacement de la CV-C sur la chaleur d'hydratation des MBE-SF en présence du PNS (SP fixe)

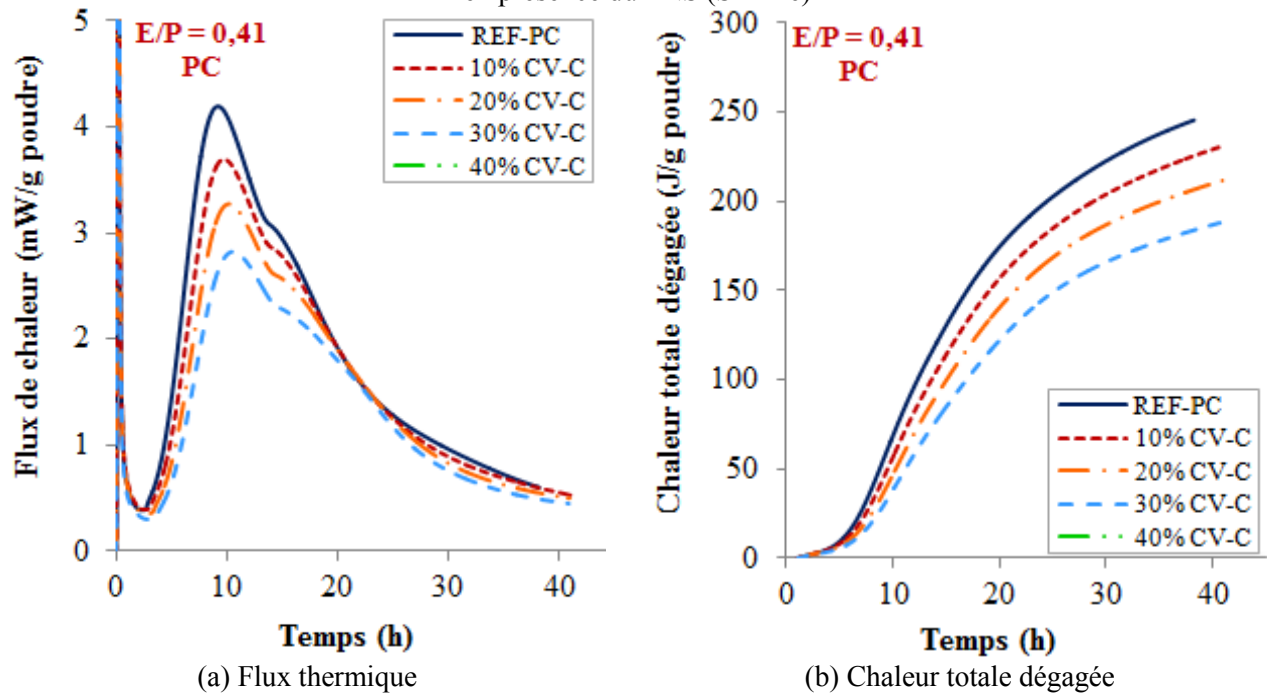


Figure 5.54 Effet du taux de remplacement de la CV-C sur la chaleur d'hydratation des MBE-SF en présence du PC (SP fixe)

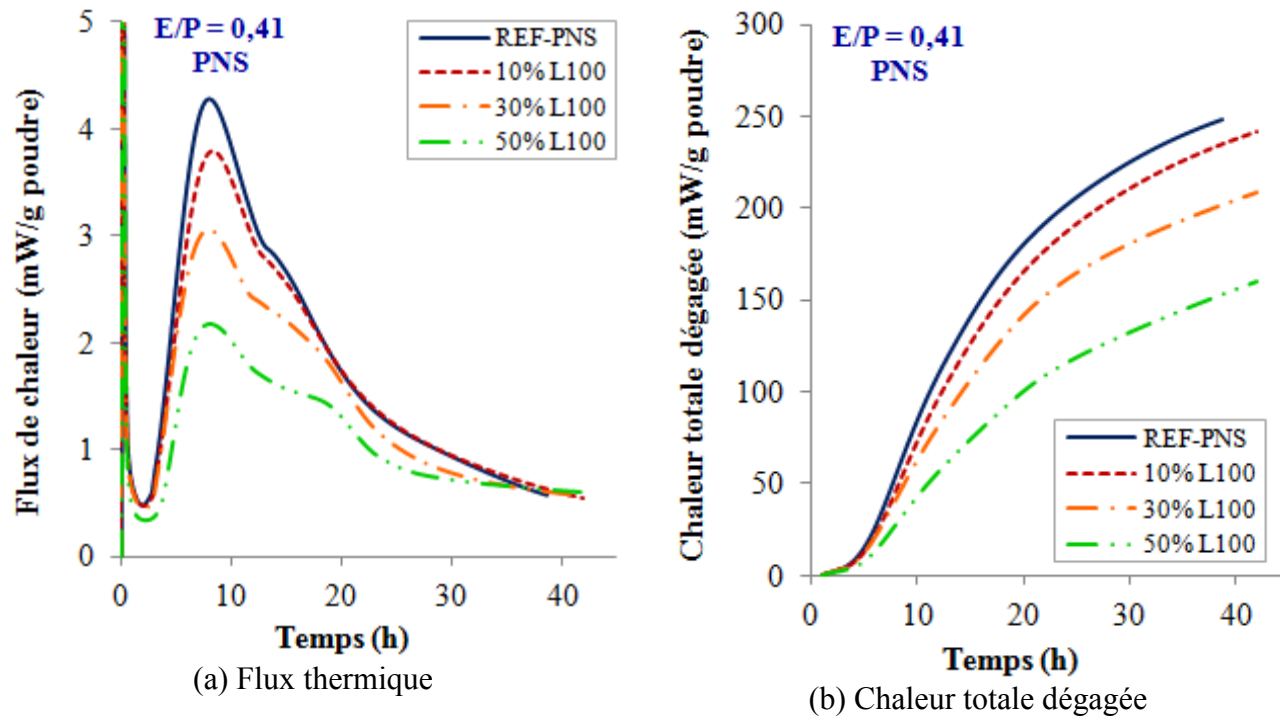


Figure 5.55 Effet du taux de remplacement du L100 sur la chaleur d'hydratation des MBE-SF en présence du PNS (SP fixe)

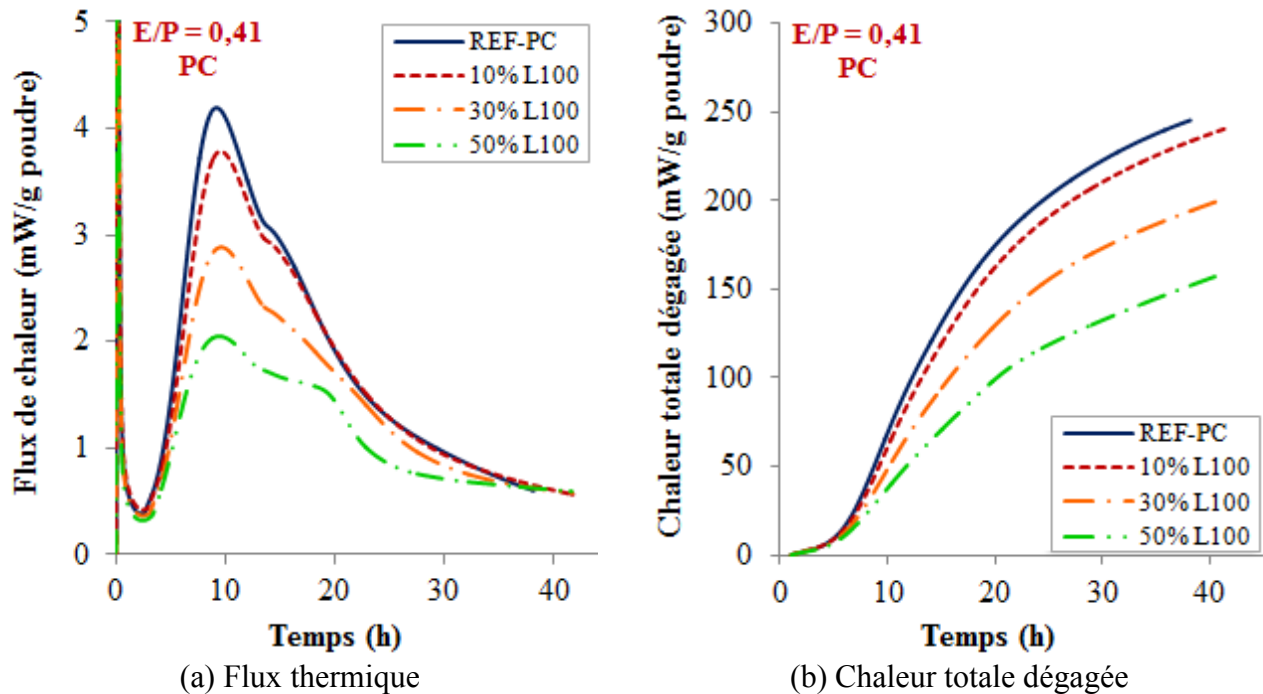


Figure 5.56 Effet du taux de remplacement du L100 sur la chaleur d'hydratation des MBE-SF en présence du PC (SP fixe)

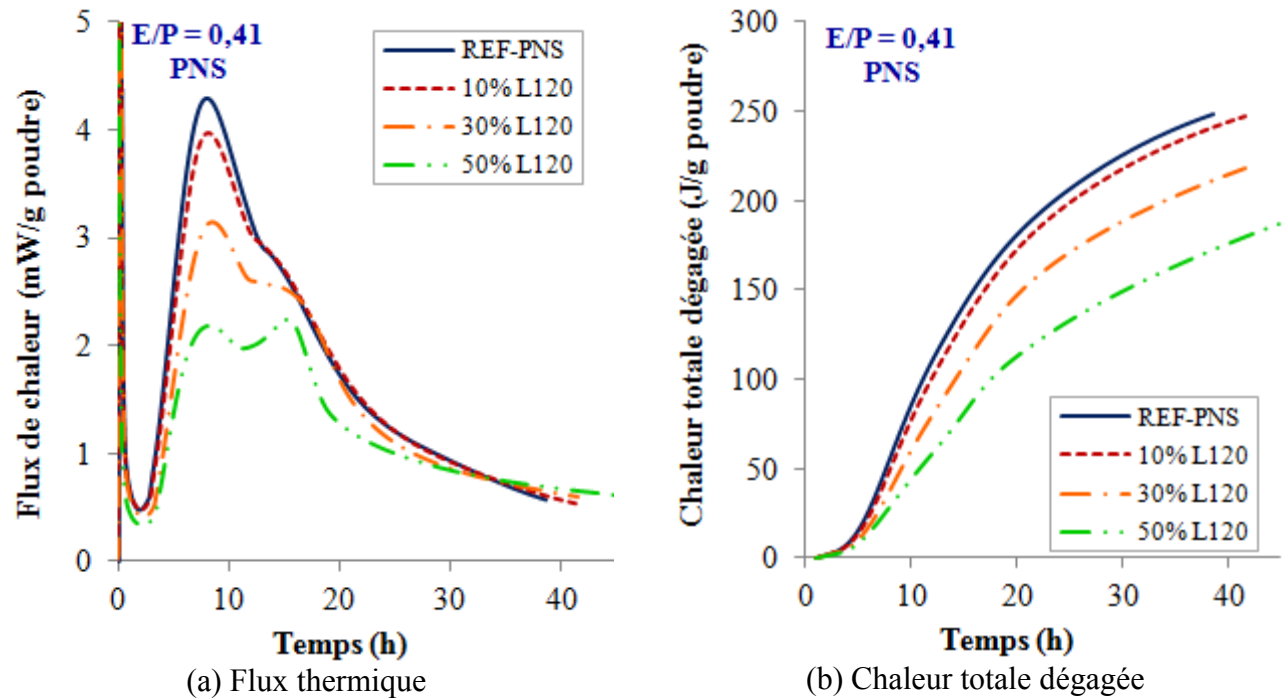


Figure 5.57 Effet du taux de remplacement du L120 sur la chaleur d'hydratation des MBE-SF en présence du PNS (SP fixe)

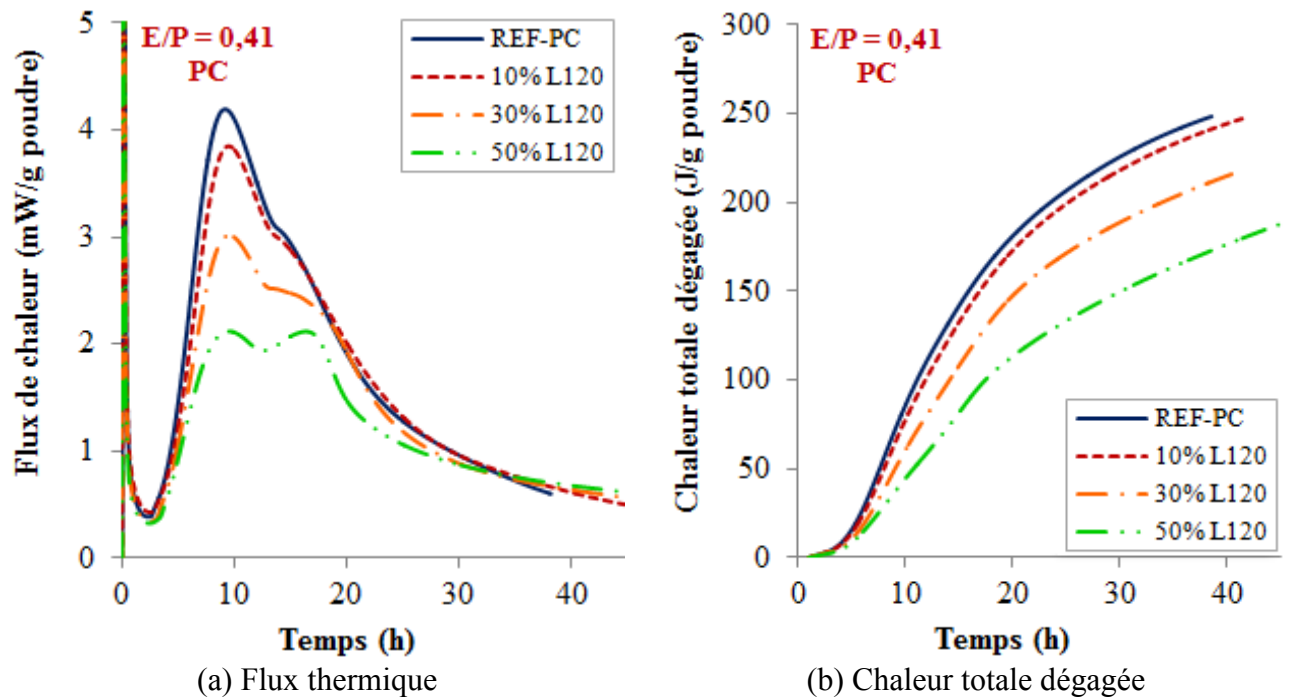


Figure 5.58 Effet du taux de remplacement du L120 sur la chaleur d'hydratation des MBE-SF en présence du PC (SP fixe)

Le remplacement partiel du ciment portland par MK, qui est classé comme matériau à réactivité relativement élevée, semble avoir une tendance à diminuer l'intensité du deuxième pic ainsi qu'à raccourcir le temps correspondant à ce pic (figures 5.59 et 5.60). Ceci est d'autant plus évident à 15% de MK et en présence du PC, où l'intensité du pic a diminué de 17% avec un raccourcissement de 1 h du temps correspondant par rapport au mélange de référence. De plus, les résultats montrent que le troisième pic d'hydratation en présence de MK est plus apparent avec du PNS qu'avec du PC.

Les résultats de l'effet du remplacement partiel du ciment par la FS avec les deux SP (PNS ou PC) sont présentés dans les figures 5.61 et 5.62. Ces figures indiquent que le remplacement jusqu'à 7% en FS n'a pas d'effet notable sur la chaleur d'hydratation des MBE-SF. En effet, des diminutions n'excédant pas 5% et 50 min sont notées dans l'intensité du deuxième pic et dans le temps correspondants à ce pic pour les deux types de SP étudiés. De plus, L'hydratation du ciment semble être stimulée avec la présence de la FS ce qui se traduit par l'augmentation de l'intensité du deuxième pic normalisée par rapport à la masse du ciment (tableau 5.3).

La figure 5.63 donne l'effet des AM sur l'intensité du pic du flux de chaleur des MBE-SF. Les résultats montrent que les deux types cendres volantes, les deux laitiers et le MK, présentent la même tendance linéaire entre le taux de remplacement et l'intensité du pic de chaleur quel que soit le type de SP utilisé. Ceci indique que l'hydratation du liant à jeune âge, est dominée principalement par l'hydratation du ciment portland et que la présence des AM contribue plus par effet de dilution, la consommation d'hydroxyde de calcium et l'approvisionnement de site de nucléation [Ballim, 2009]. Par ailleurs, la FS a présenté sa propre tendance, avec les deux SP, qui indique que l'augmentation de son pourcentage jusqu'à 7% n'a pas un effet négatif sur l'hydratation du liant. Ceci est lié principalement à la présence de plus de site de nucléation pour le dépôt des hydrates cristallisés et la germination du C-S-H.

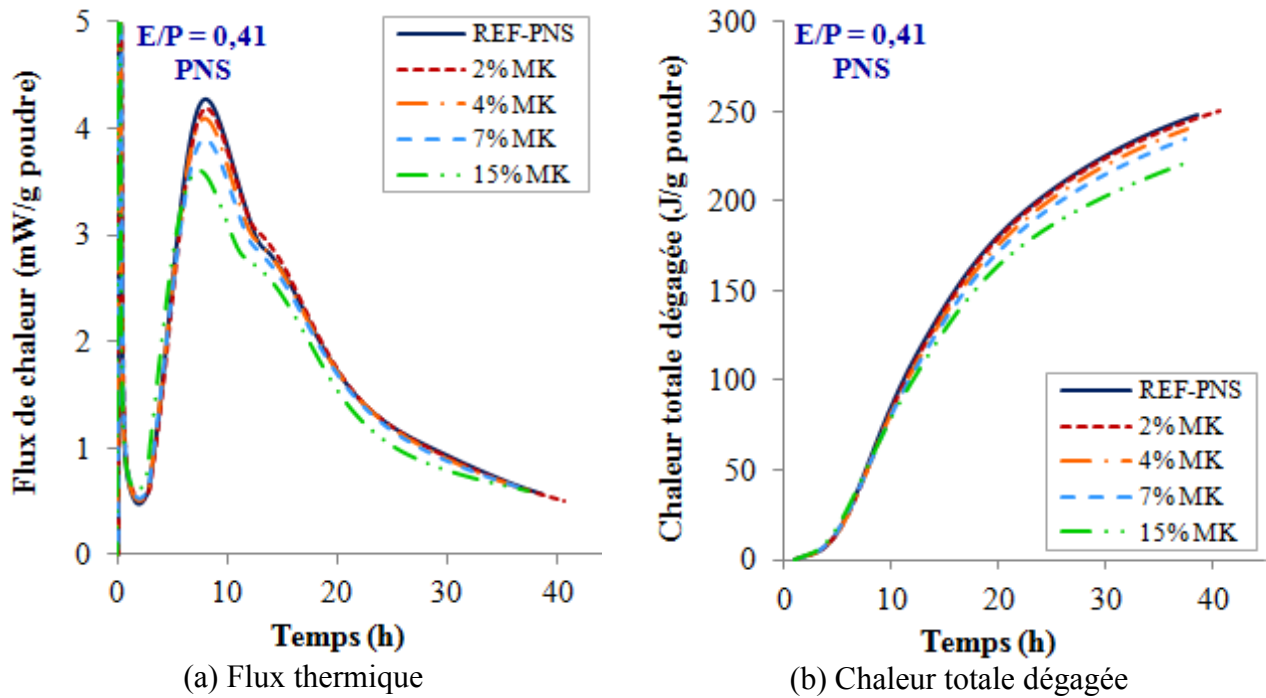


Figure 5.59 Effet du taux de remplacement du MK sur la chaleur d'hydratation des MBE-SF en présence du PNS (SP fixe)

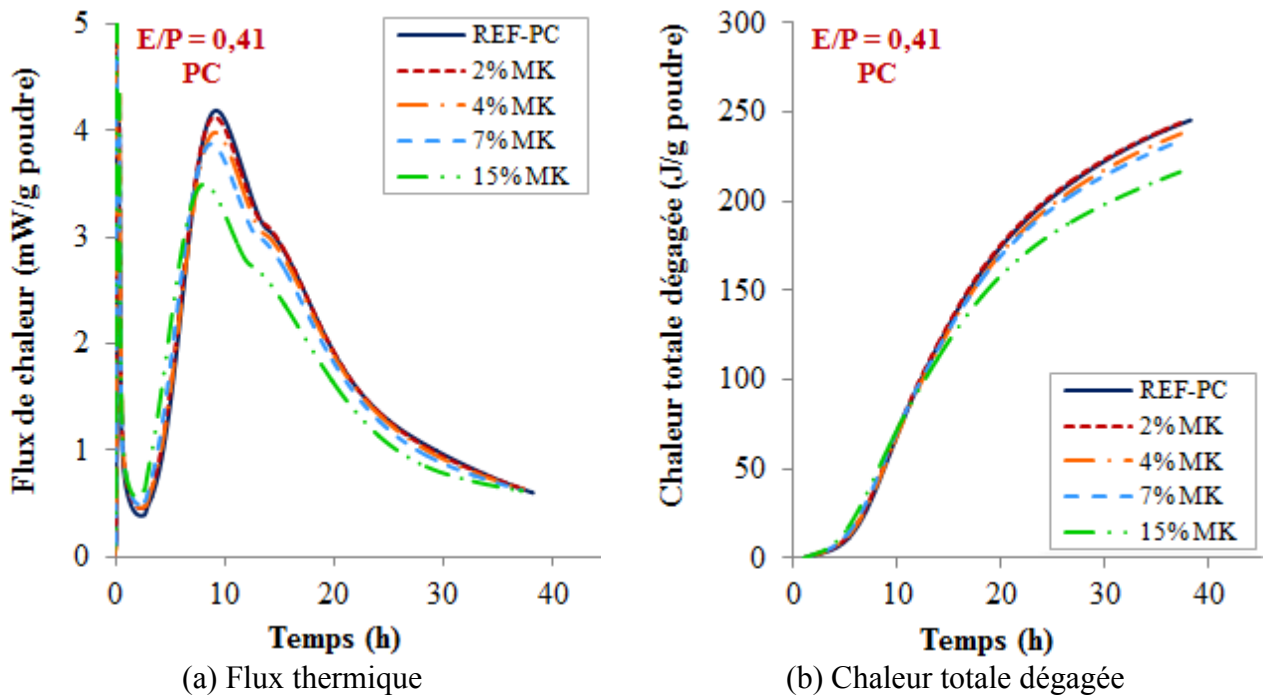


Figure 5.60 Effet du taux de remplacement du MK sur la chaleur d'hydratation des MBE-SF en présence du PC (SP fixe)

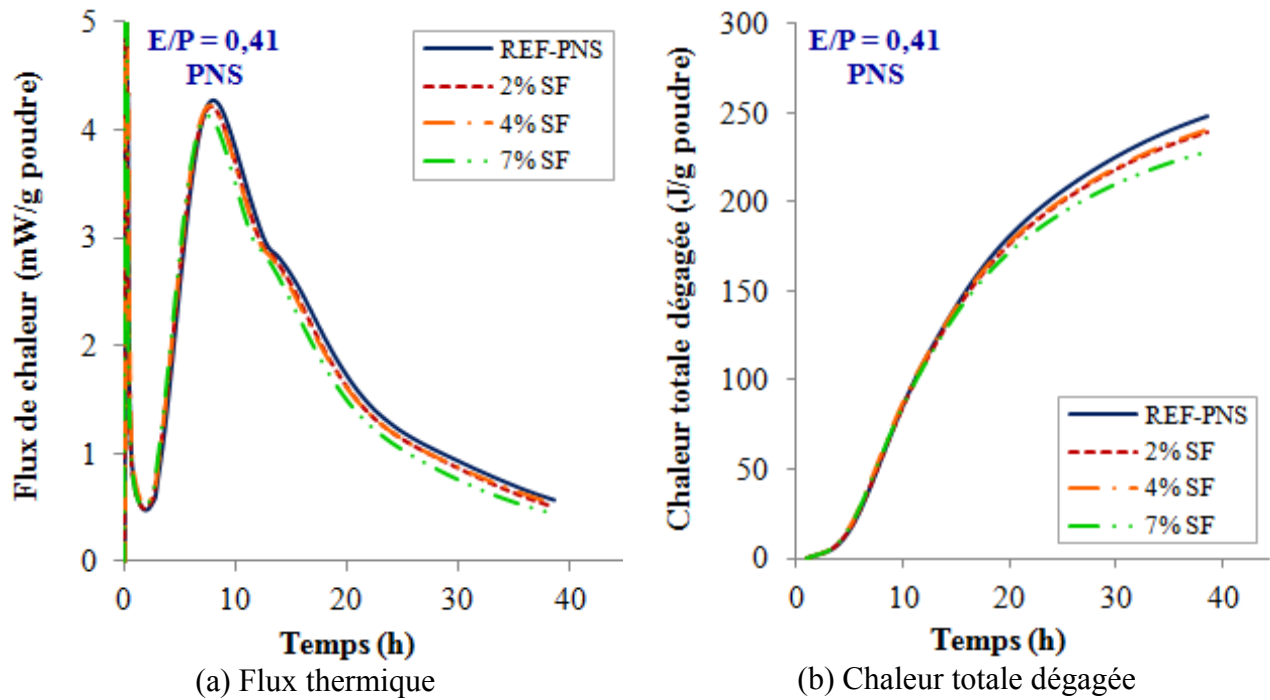


Figure 5.61 Effet du taux de remplacement du SF sur la chaleur d'hydratation des MBE-SF en présence du PNS (SP fixe)

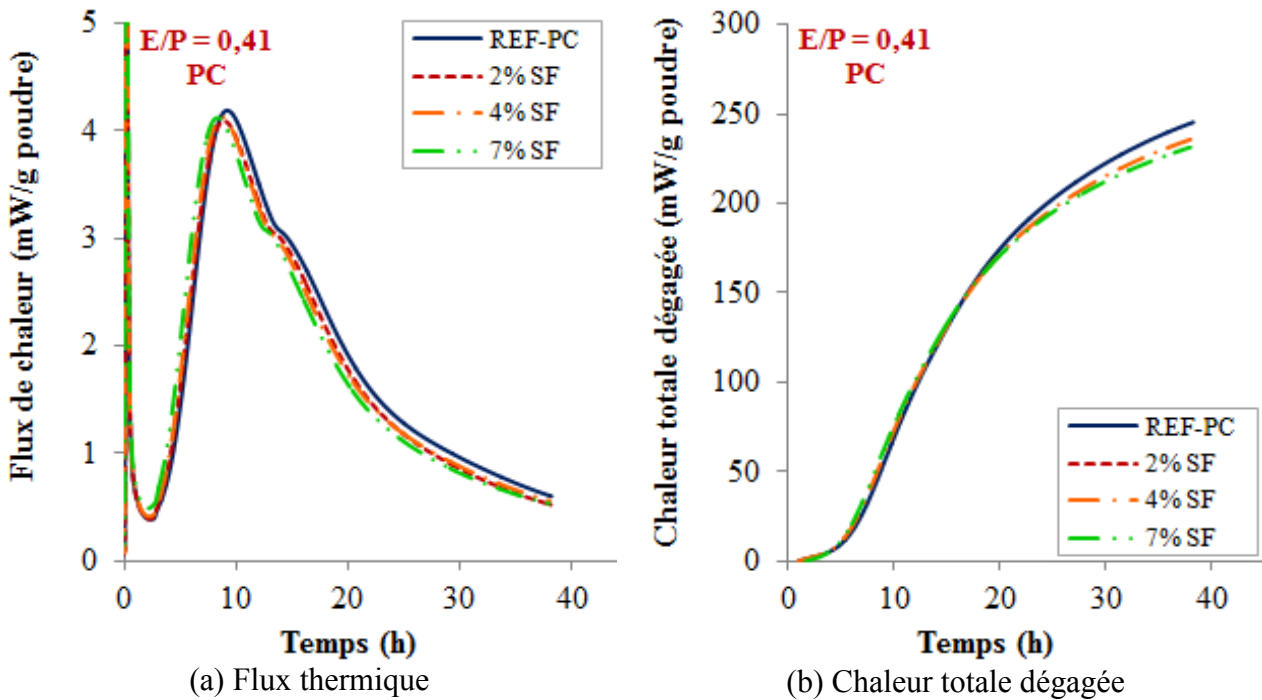


Figure 5.62 Effet du taux de remplacement du SF sur la chaleur d'hydratation des MBE-SF en présence du PC (SP fixe)

Tableau 5.3 Valeurs caractéristiques des courbes d'hydratation des MBE-AP

Composition	PNS				PC			
	t (q _{max}) (h)	q _{max} (W/kg poudres)	q _{max} (W/kg ciment)	Q _{37h} (J/g)	t (q _{max}) (h)	q _{max} (W/kg poudres)	q _{max} (W/kg ciment)	Q _{37h} (J/g)
REF	8,00	4,29	4,29	245	9,19	4,19	4,19	243
10% CV-F	8,40	3,92	4,25	230	9,45	3,73	4,01	224
20% CV-F	8,37	3,49	4,25	213	9,96	3,26	3,95	204
30% CV-F	8,59	3,02	4,21	191	10,37	2,81	3,89	181
40% CV-F	8,80	2,57	4,17	168	10,67	2,39	3,87	160
10% CV-C	8,20	3,96	4,29	234	9,72	3,69	4,10	223
20% CV-C	8,83	3,44	4,20	210	10,22	3,27	4,08	204
30% CV-C	9,22	2,98	4,17	189	10,69	2,82	4,03	182
40% CV-C	9,83	2,58	4,20	168	-	-	-	-
10% L100	8,44	3,78	4,10	231	9,57	3,78	4,11	231
30% L100	8,00	3,05	4,25	198	9,63	2,88	4,03	191
50% L100	8,03	2,17	4,23	150	9,44	2,05	4,01	149
10% L120	8,16	3,97	4,30	238	9,50	3,85	4,18	235
30% L120	8,53	3,14	4,37	208	9,56	3,02	4,21	203
50% L120	9,17	2,18	4,18	169	9,54	2,12	4,14	169
2% MK	8,07	4,18	4,25	243	9,07	4,13	4,21	243
4% MK	7,92	4,09	4,25	239	9,11	3,99	4,15	237
7% MK	7,91	3,90	4,18	233	8,75	3,88	4,16	233
15% MK	7,42	3,61	4,23	221	8,14	3,50	4,11	216
2% SF	7,80	4,21	4,28	237	8,92	4,09	4,17	232
4% SF	7,65	4,23	4,38	237	8,72	4,13	4,30	234
7% SF	7,55	4,13	4,42	226	8,32	4,12	4,43	230

q_{max} : intensité du deuxième pic, T (q_{max}) : temps correspondant au deuxième pic, Q_{37h} : chaleur total dégagée au bout de 37 h.

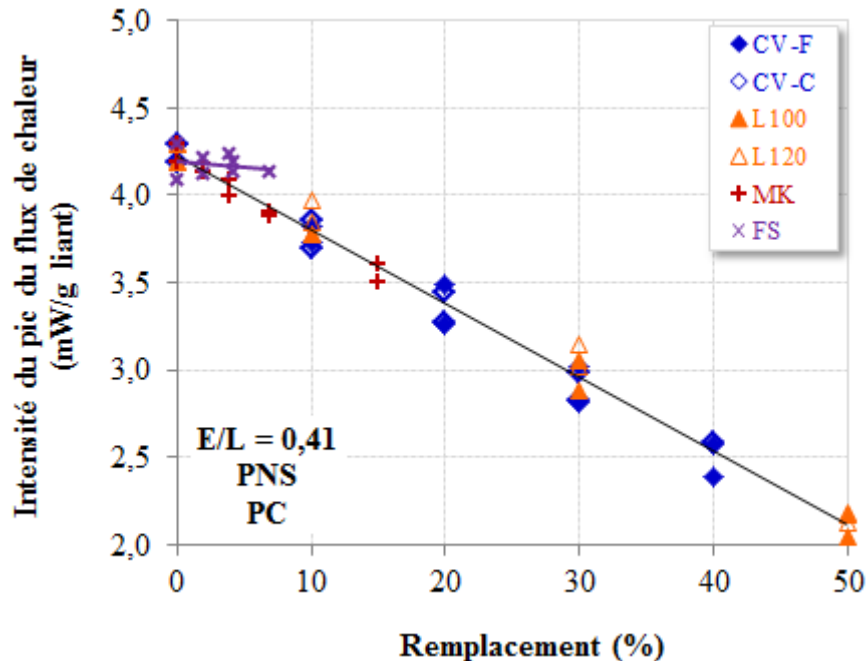


Figure 5.63 Effet du taux de remplacement des AM sur l'intensité du pic du flux de chaleur des MBE-SF

5.3.2.2 Temps de prise

Comme il est déjà mentionné au paragraphe 5.1.5, le temps de prise finale est estimé à partir des courbes de calorimétrie, qui correspondent à une entente maximale du pic d'hydratation. Les figures 5.64 et 5.65 donnent une estimation de l'effet du remplacement du ciment par les AM, en présence du PNS ou du PC, sur le temps de prise finale des MBE-SF.

Comme il est déjà noté dans le cas des MBE-AP, les AM présentant une finesse élevée comme le MK et la FS, ont tendance à diminuer le temps de prise des MBE-SF, ce qui est plus notable en présence du PC. Ceci est dû principalement à la performance du PC à disperser les particules fines qui performant à leur tour comme des sites de nucléation pour la précipitation des produits d'hydratation comme le C-S-H. Quant au deux laitiers, aucun effet significatif n'est noté sur le temps de prise par rapport à la finesse ou au taux de remplacement utilisé, quel que soit le type de SP.

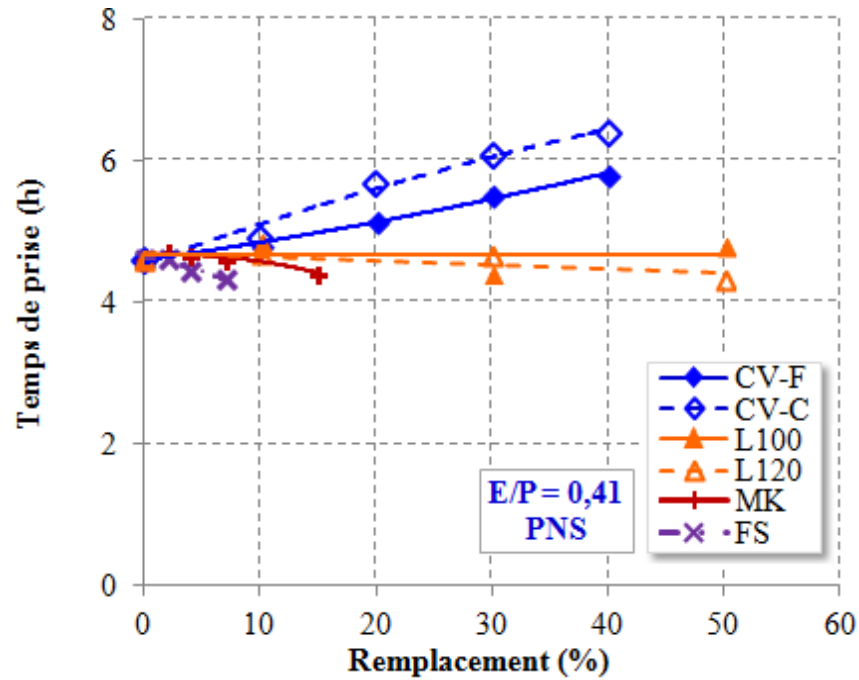


Figure 5.64 Effet des AM sur le temps de prise des MBE-SF en présence de PNS (SP fixe)

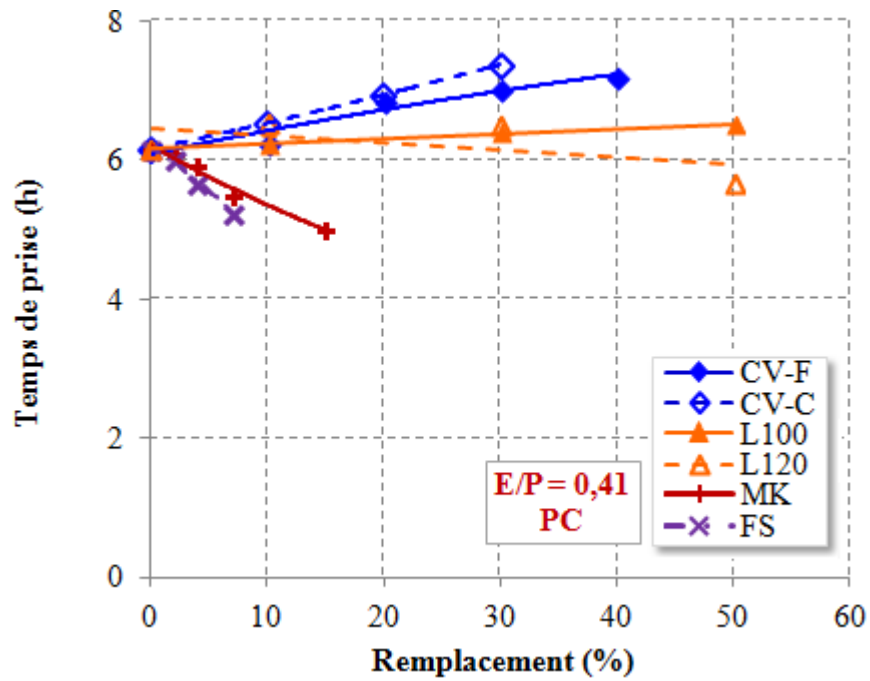


Figure 5.65 Effet des AM sur le temps de prise des MBE-SF en présence de PC (SP fixe)

Par ailleurs, les deux cendres volantes semblent avoir un petit effet retardateur de la prise des MBE-SF, surtout pour la CV-C et en présence du PNS, mais le retard le plus important reste inférieur à 2 h. Les résultats montrent de plus que les MBE-SF en présence du PC ont donné des temps de prise légèrement plus importants que ceux en présence du PNS. Le SP à base de PC a montré sa performance à maintenir la fluidité avec les différents AM en comparaison avec le SP à base de PNS, ce qui peut se traduire par la suite par un léger retard dans la prise finale.

5.3.2.3 Résistance à la compression

Le développement des résistances à la compression des MBE-SF contenant différents taux de substitution en AM, en présence du PNS ou PC, à 1, 28 et 91 jours, sont présentées dans les figures 5.66 – 5.72.

Il apparaît que l'effet de la FS sur le développement des résistances à la compression à 24 h n'est pas très significatif pour les deux types de SP. Cependant, une légère augmentation de 6 et 9% est notée à 2% de remplacement et avec PNS et PC, respectivement. À 4 et 7% de remplacement, les résistances sont comparables à ceux du mélange de référence avec le PNS, tandis qu'avec le PC une diminution de 13% est notée pour 7% de remplacement. De même pour le MK, jusqu'à 7% de remplacement et avec les deux SP, les résistances à 24 h sont très comparables à celles des mélanges de référence. À 15% de MK, des diminutions de 14 et 22% sont notées en présence de PC et PNS respectivement. D'autre part, l'effet de dilution du ciment apparaît clairement à 24 h pour la CV-F, CV-C, L100 et le L120, où la diminution la plus importante de chacun de ces AM, pour les taux de substitution maximaux, est de 64, 66, 68 et 60%, respectivement, par rapport au MBE-SF de référence et en présence du PNS.

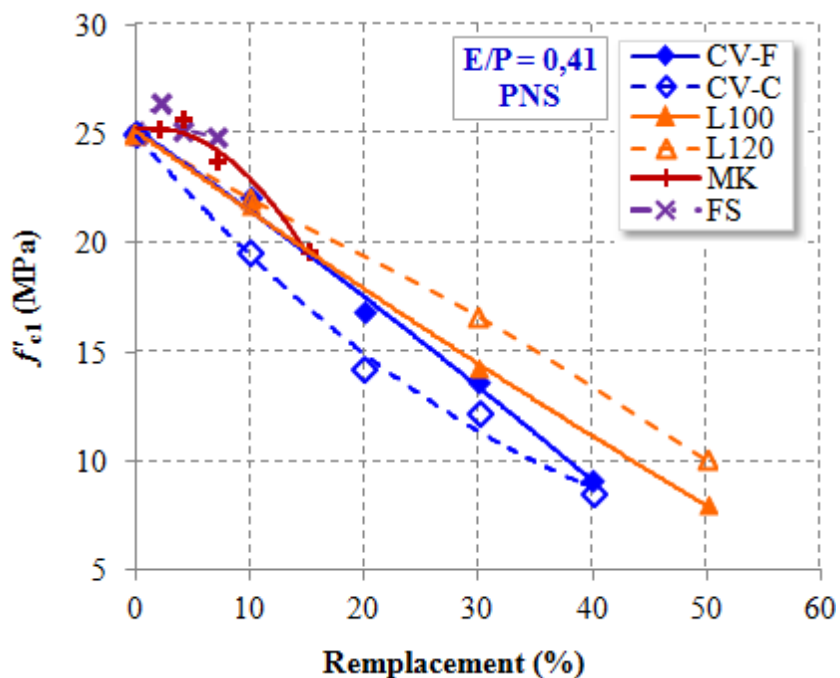


Figure 5.66 Effet des AM sur f'_{c1} en présence de PNS (SP fixe)

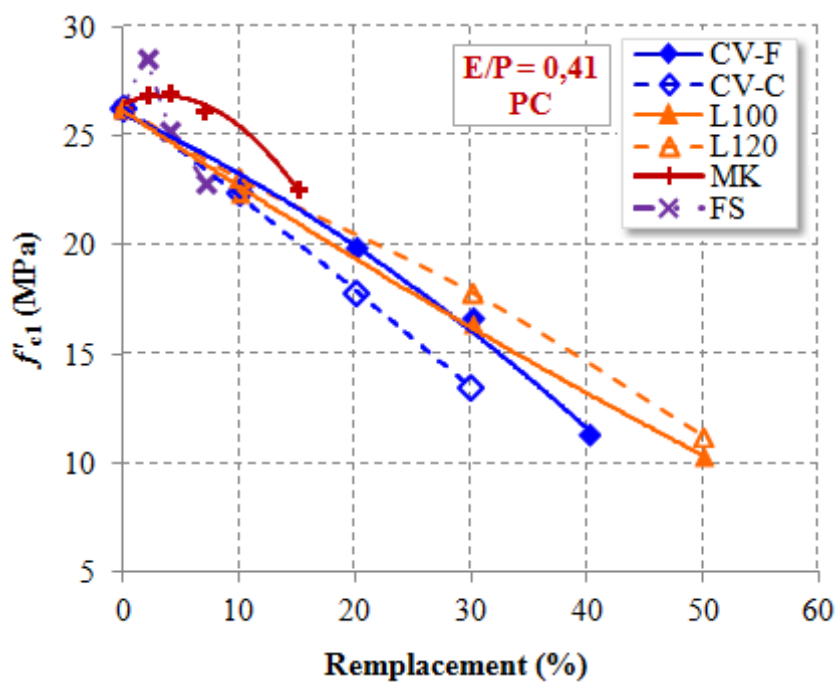


Figure 5.67 Effet des AM sur f'_{c1} en présence de PC (SP fixe)

Il est observé aussi que, les résistances des MBE-SF contenant la CV-F prennent une légère avance sur celle des MBE-SF en présence de la CV-C, ceci a déjà été noté dans le cas des MBE-AP. Par ailleurs, il faut noter que contrairement à ce qui est trouvé dans le cas des MBE-AP (paragraphe 5.1.6), le type de SP n'a pas influencé les résistances à jeune âge des MBE-SF de référence.

La figure 5.68 montre la relation entre la chaleur totale dégagée au bout de 24 heures d'hydratation et les résistances à la compression développée à cet âge pour les MBE-AP et les MBE-SF. Il apparaît clairement que, pour les différents AM étudiés les résistances à la compression à jeune âge évoluent plus rapidement que le dégagement de chaleur au bout de 24 heures. Mounanga et coll. [2011], rapportent que dans certaines études [Byfors, 1980; Regourd et coll., 1980] une relation quasi-linéaire est trouvée entre le degré d'hydratation et la résistance à la compression des bétons. Alors que dans leur étude, une relation non linéaire a été trouvée avec l'utilisation du laitier et des fillers calcaires en combinaison binaire et ternaires. Ceci est un des buts de l'utilisation de certain AM, qui est de diminuer le dégagement de chaleur tout en ayant un bon développement des résistances.

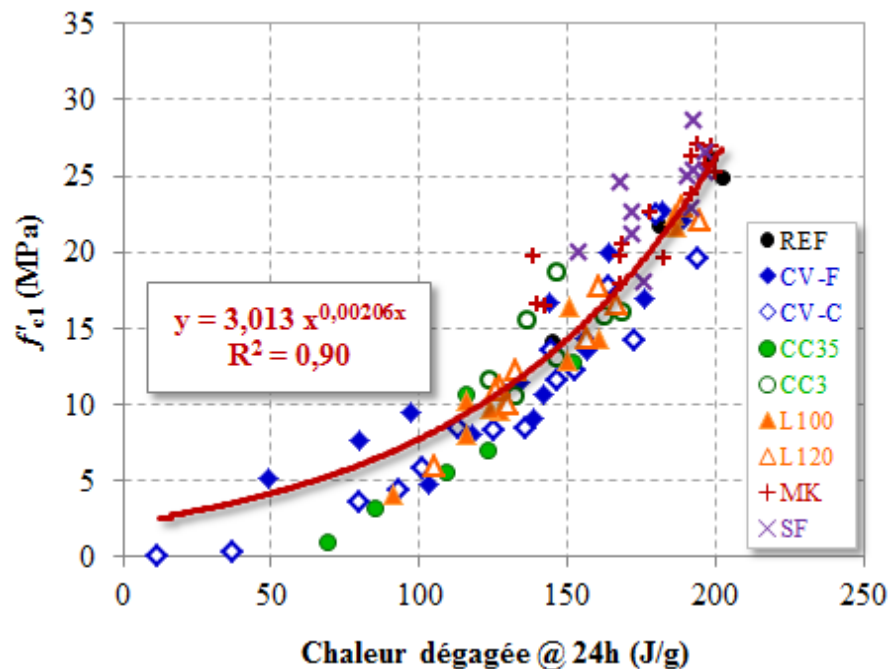


Figure 5.68 Évolution de f'_{c1} en fonction de la chaleur dégagée des MBE-AP à 24 h

Après 28 jours, La présence de jusqu'à 7% de FS dans les MBE-SF, montre une bonne performance en terme de résistance à la compression. Une augmentation de 9% et 21% est notée pour 7% de FS et avec PNS et PC, respectivement, comparativement aux résistances des mélanges de référence respectifs. À cet âge une quantité suffisante de portlandite s'est formée pour réagir avec les fines particules réactive de la silice grâce à la réaction pouzzolanique et former le C-S-H qui fournira un gain supplémentaire dans les f'_c . Le gain de résistance continu avec le temps et il est noté qu'à 56 jours, les MBE-SF contenant la FS continue à développer de bonnes résistances et de prendre une avance de 14% par rapport aux mélanges de référence en présence de 7% de FS et pour les deux cas de SP.

L'effet du remplacement partiel de 2 à 15% de ciment par le MK sur la résistance développée à 28 jours, n'a pas présenté une aussi bonne performance que la FS, mais les résistances obtenues demeurent très proches à celles des mélanges de référence. Cependant, une amélioration limitée à un maximum de 8% est observée, pour un remplacement de 4% en MK et en présence du PC, par rapport à celle du REF-PC. Bien que le MK est connu pour ses propriétés pouzzolaniques, mais le gain dans les résistances entre 28 et 56 jours continue à être limité. À 56 jours, les résistances obtenues sont comparables et même inférieures à celles des MBE-SF de référence où une légère diminution de 5% est notée avec 15% de MK, et pour les deux cas de SP. Les mêmes résultats ont été observés par Velosa et coll. [2009] qui l'ont attribué au fait que le MK utilisé n'a pas été chauffé à une température assez élevée pour atteindre la bonne réactivité pouzzolanique.

Dans le cas du laitier à finesse modérée le L100 et pour les deux cas de SP, les résistances à 28 jours ont augmenté avec l'accroissement du pourcentage de substitution en L100, mais un seuil apparaît à 30% de L100. En effet, pour 10, 30% et 50% de L100, les résistances sont de 60, 64 et 61 MPa en présence du PNS comparativement à 59 MPa pour REF-PNS et de 59, 67 et 62 comparativement à 59 MPa pour REF-PC. Quant au laitier L120, la résistance à 28 jours atteint 66 et 70 MPa pour un taux de remplacement de 50% en présence du PNS et PC respectivement.

À 56 jours, les deux laitiers continuent à développer les meilleures résistances, à 30% de remplacement de L100 et L120 des gains entre 12 et 20% sont obtenus comparativement aux résistances à 28 jours. Les MBE-SF ont pu même atteindre l'ordre de 80MPa avec 50% de L120 en présence du PC.

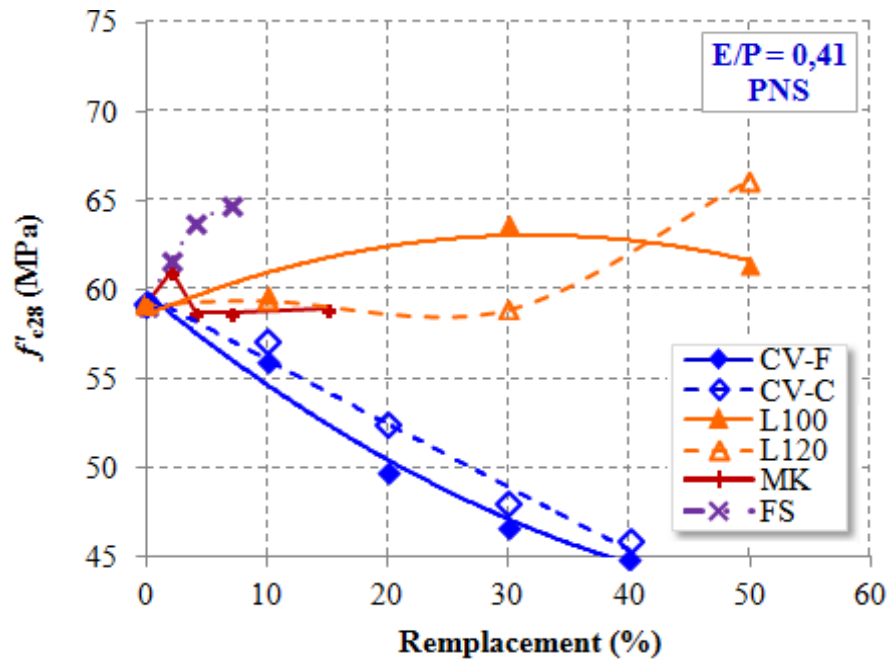
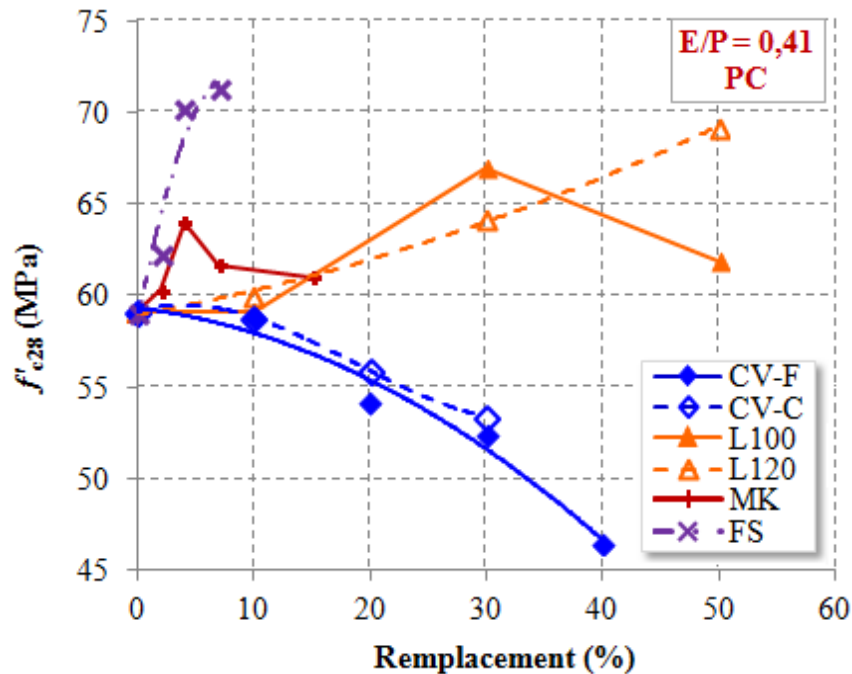


Figure 5.69 Effet des AM sur f'_{c28} en présence de PC (SP fixe)

Figure 5.70 Effet des AM sur f'_{c28} en présence de PC (SP fixe)

La substitution du ciment par la CV-F ou la CV-C, pour les deux cas de SP, résulte en une diminution importante dans la résistance à 28 jours en comparaison avec les mélanges de référence respectifs. Néanmoins un remplacement jusqu'à 20% est acceptable pour les deux cendres sans avoir un impact négatif sur les résistances visées pour l'application des infrastructures de transport. De plus, parmi les AM étudiés et grâce à leurs bonnes réactivités pouzzolaniques, la CV-C et la CV-F ont présenté les meilleurs gains de résistances au bout de 56 jours par rapport aux résistances à 28 jours, et surtout en présence du PNS. Une substitution de 20% de ciment par la CV-F ou la CV-C en présence du PNS a résulté en une augmentation de la résistance de 28% et 32%, respectivement, en comparaison avec 8% pour le mélange de référence par rapport à 28 jours. De plus, à 40% de remplacement pour les deux cendres volantes les résistances des mortiers à 56 jours sont supérieurs à 50 MPa, pour les deux cas de SP.

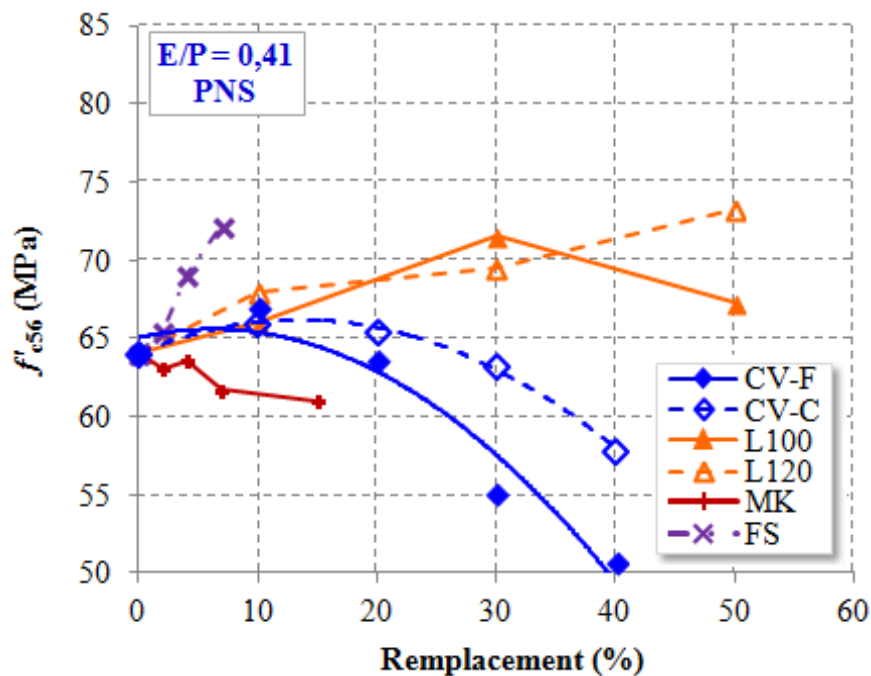


Figure 5.71 Effet des AM sur f'_{c56} en présence de PNS (SP fixe)

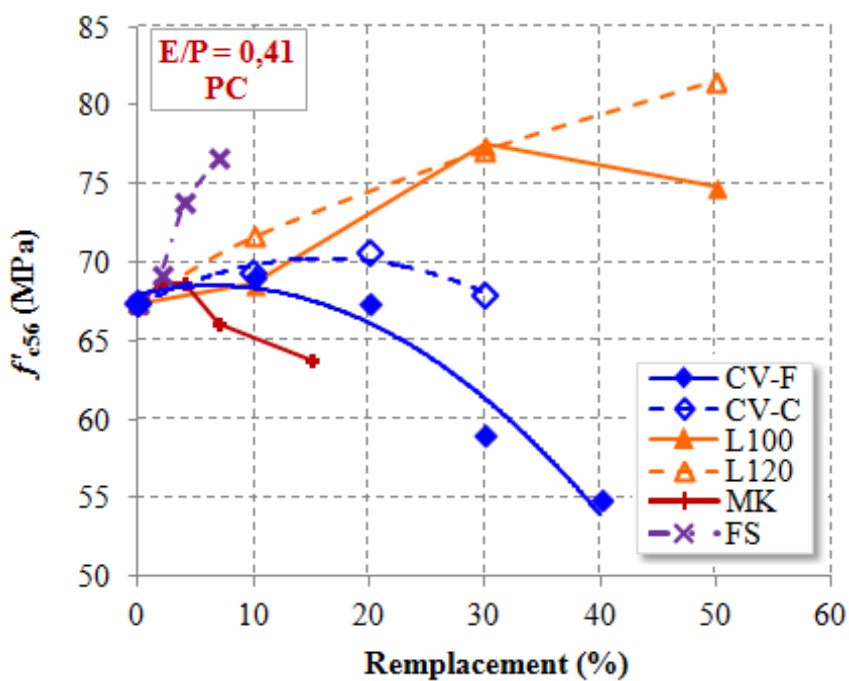


Figure 5.72 Effet des AM sur f'_{c56} en présence de PC (SP fixe)

5.3.2.4 Synthèse

- Le flux de chaleur des MBE-SF de référence n'est pas influencé par le type de SP utilisé (PNS ou PC).
- L'effet du taux de remplacement des AM sur la chaleur d'hydratation est plus important que l'effet du type et des caractéristiques des AM utilisés.
- Les caractéristiques des laitiers étudiés ainsi que l'augmentation de leurs taux de remplacement n'ont pas d'effet sur le temps de prise des MBE-SF.
- Pour les différents AM utilisés, le type de SP n'a pas un effet sur les résistances à la compression à jeune âge.
- Grâce à la très grande surface spécifique et à la réactivité pozzolanique de la FS, cette dernière a montré une meilleure performance sur les résistances à la compression à 28 et 56 j surtout en présence de PC en comparaison avec le MK.
- Généralement, le laitier L120 a présenté de meilleures résistances à la compression à jeune âge ainsi qu'à long terme en comparaison avec le 100.
- Un remplacement jusqu'à 25% de ciment par la CV-F ou la CV-C est possible sans nuire à la résistance souhaitée.

5.4 CORRÉLATION ENTRE LES ESSAIS DE FLUIDITÉ ET LES PARAMÈTRES RHÉOLOGIQUES

Plusieurs chercheurs ont tenté de mettre au point le lien entre les tests empiriques et les mesures rhéologiques des systèmes cimentaires. Des relations purement empiriques [Ferraris et coll. 1998] et [Flatt et coll. 2006] et d'autres basées sur des modèles physiques physiques [Roussel et Coussot, 2005] ont été établis. Il est bien considéré que l'étalement est lié au seuil de cisaillement et les mesures du temps d'écoulement sont liées à la viscosité plastique (temps d'écoulement à travers le v-funnel ou le T_{50}). D'autres auteurs sont en désaccord avec le fait que l'étalement du béton soit l'unique fonction du seuil de cisaillement, mais plutôt la fonction des deux paramètres, le seuil de cisaillement et la viscosité plastique [Nielsen et coll., 2003, Utsi et coll., 2003 et Esping, 2007].

À travers les résultats obtenus de l'étude sur l'effet des ciments binaires sur la rhéologie des MBE-AP et les MBE-SF, un nombre assez important de résultats est recueilli, balayant un intervalle de seuil de cisaillement entre 1,3 et 250 Pa et de viscosité plastiques entre 1,6 et 14 Pa.s. Ces résultats sont utilisés afin d'établir des relations entre les mesures des paramètres rhéologiques (seuil de cisaillement et viscosité plastique) et les mesures de la maniabilité (étalement au mini-cône et temps d'écoulement à travers l'entonnoir en V). Les figures 5.73 - 5.74 illustrent la variation de l'étalement en fonction du seuil de cisaillement et de la viscosité plastique. Il est clair que l'étalement est lié principalement au seuil de cisaillement qu'à la viscosité plastique. Néanmoins, la relation entre l'étalement et le seuil de cisaillement indique que pour les MBE présentant une grande fluidité l'erreur induite dans les mesures du seuil de cisaillement est très importante. De même, pour des seuils de cisaillement très élevés, beaucoup de variabilités sont obtenues dans les valeurs de l'étalement.

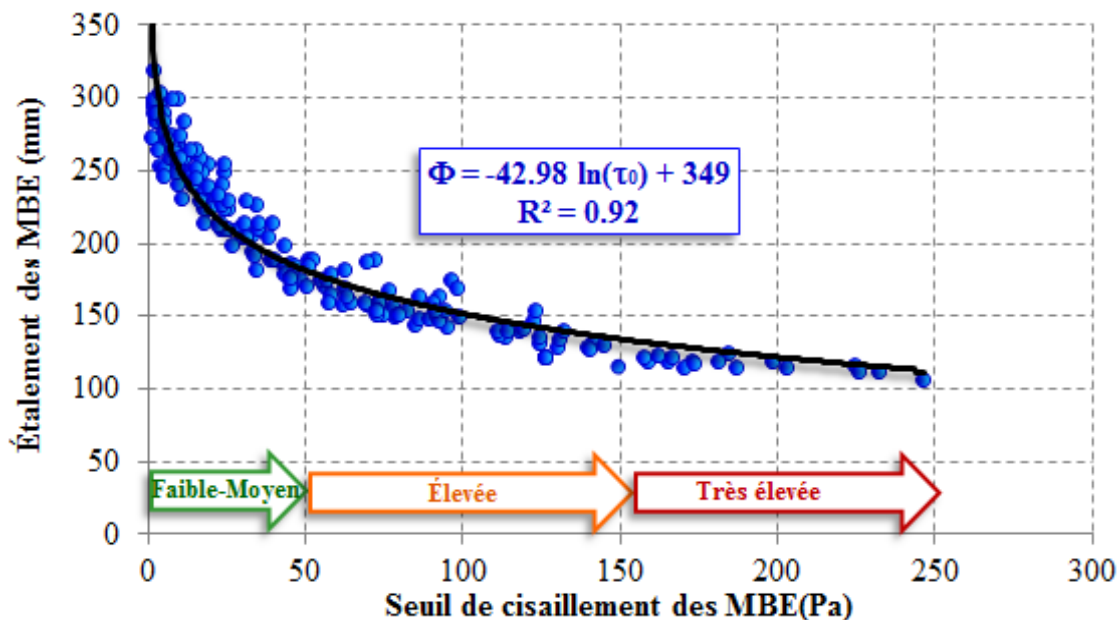


Figure 5.73 Représentation de l'étalement en fonction du seuil de cisaillement

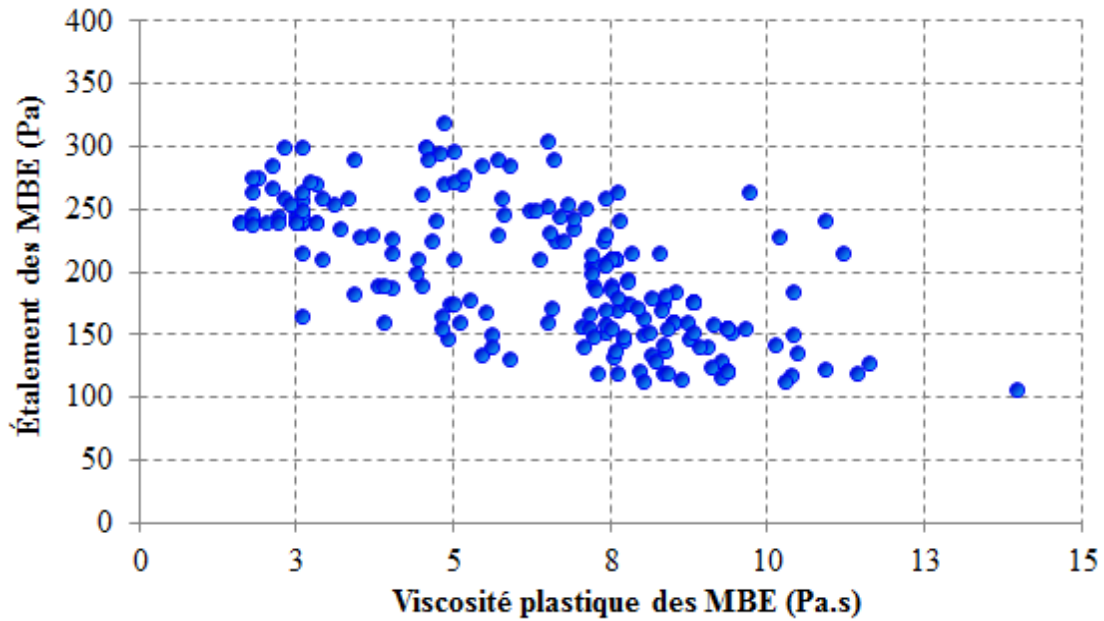


Figure 5.74 Représentation de l'étalement en fonction de la viscosité plastique

Par contre, le temps d'écoulement des MBE à travers le V-funnel ne dépend pas seulement de la viscosité plastique mais aussi du seuil de cisaillement (figure 5.75). En effet, une relation linéaire est noté entre le temps d'écoulement à travers le v-funnel et la viscosité plastique pour de faibles seuils de cisaillement. Plus le seuil de cisaillement augmente et s'éloigne des domaines "autoplaçant et semi fluide" plus la relation entre le temps d'écoulement des MBE au v-funnel et la viscosité plastique s'affaibli.

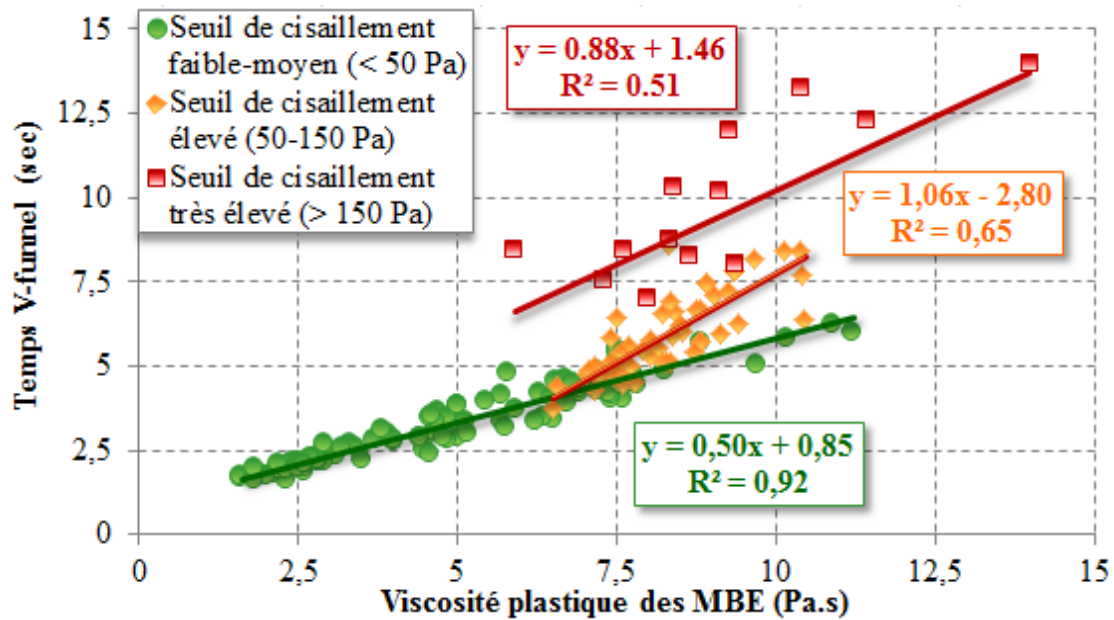


Figure 5.75 Représentation du temps V-funnel en fonction de la viscosité plastique et du seuil de cisaillement

5.5 CONCLUSIONS

La sélection des AM et des adjuvants chimiques est un problème crucial dans la conception des bétons fluides. Des tendances non systématiques sont notées lors de cette étude, dont les constations les plus importantes sont :

- L'augmentation du taux de substitution du ciment par la CV-C a montré une forte tendance à augmenter la fluidité et à diminuer la viscosité plastique des MBE-AP et des MBE-SF. Pour des taux de remplacement élevés, les différents MBE ont présenté de faibles résistances à la compression à jeune âge. Cependant, un remplacement jusqu'à 25% en CV-C est envisageable pour les MBE-AP et les MBE-SF, respectivement.
- Les propriétés rhéologiques des MBE en présence de la CV-F dépendent fortement de la composition du mélange et aussi de la combinaison SP-AV utilisé. Pour les MBE-AP et du point de vue fluidité, l'utilisation de la CV-F semble plus avantageuse en

présence de PNS-AV1. Un remplacement jusqu'à 25% de CV-F s'avère intéressant vis-à-vis les propriétés rhéologiques et mécaniques.

- L'utilisation du filler à finesse élevée (CC3) semble être bénéfique en présence de PNS-AV1. En effet, plusieurs avantages sont notés : augmentation de la fluidité, diminution de la chaleur dégagée avec diminution du temps de prise et augmentation des résistances à la compression surtout à jeune âge.
- Les propriétés rhéologiques des MBE contenant le L100 ou L120 sont affectées par le type de SP utilisé. La viscosité plastique augmente en présence de PNS alors qu'elle diminue en présence de PC. Ceci est d'autant plus important avec le L100 (à finesse modérée). Pour les deux types de MBE étudiés, un remplacement partiel allant jusqu'à 50% de L100 ou L120 peut être pris en considération sans se soucier des résistances développées à 28 jours.
- L'incorporation du MK semble augmenter significativement le seuil de cisaillement et la viscosité plastique, ceci est d'autant plus important que le rapport E/P diminue (cas des MBE-SF). Ce qui rend son utilisation très avantageuse pour les applications qui nécessitent des mélanges très visqueux.
- La performance du MK étudié vis-à-vis le développement des résistances à la compression reste limitée par rapport à l'espérance attendue.
- Pour les types de MBE étudiés, la FS a tendance à diminuer la viscosité plastique et à augmenter drastiquement le seuil de cisaillement. Une bonne performance est notée vis-à-vis les résistances développées à jeune âge et long terme.

CHAPITRE 6 : EFFET DES CARACTÉRISTIQUES DES AJOUTS MINÉRAUX SUR LES PROPRIÉTÉS RHÉOLOGIQUES DES MBE

6.1 INTRODUCTION

La performance des ajouts minéraux (AM) et des fillers dans le béton dépend fortement de leurs caractéristiques physiques, minéralogiques et chimiques qui varient selon la nature et la source de ces matériaux.

Les AM de cette étude possèdent différentes propriétés physiques, minéralogiques et chimiques, entre autre la surface spécifique, la distribution granulométrique, la forme des particules et la réactivité chimique, qui définissent et contrôlent la demande en eau, la demande en adjuvants, la prise ainsi que les réactions d'hydratation [Celik, 2008; Sprung et coll. 2009].

Les résultats du chapitre 5 ont montré des variations significatives des propriétés rhéologiques des MBE et des tendances pas évidentes dépendamment de ces propriétés. Dans ce chapitre, il s'agit de mettre la lumière sur relation entre les propriétés des poudres utilisées (Surface spécifique, distribution granulométrique, la forme ainsi que la contribution des adjuvants) et les propriétés rhéologiques (seuil de cisaillement et viscosité plastique) des MBE.

6.2 EFFET DE LA SURFACE SPÉCIFIQUE DES AM ET DES FILLERS SUR LES PROPRIÉTÉS RHÉOLOGIQUES DES MBE

Les AM utilisés en différentes proportions avec le ciment ont donné des surfaces spécifiques, mesurées par BET, qui varient entre 970 à 2565 m²/kg. Les figures 6.1 à 6.4 représentent la variation du seuil de cisaillement et de la viscosité plastique, des MBE-AP et MBE-SF pour les deux cas de SP, en fonction de la surface spécifique mesurée par BET. Les résultats montrent que les variations dans la surface spécifique des poudres utilisées a un effet apparent sur le seuil de cisaillement, et ceci pour les deux type de MBE étudiés (MBE-AP et MBE-SF). En effet, l'utilisation des poudres plus fines que le ciment, ou encore ultra fines comme la FS et le MK, présentant des surfaces spécifiques mesurés par BET huit à 13 fois plus importantes que celle du ciment, augmente la surface spécifique totale du liant. Ceci a pour effet d'augmenter la quantité

nécessaire d'eau pour mouiller la surface des particules solides ce qui peut se traduire par une diminution dans la fluidité du mélange. Des déviations dans les résultats sont notées pour les ciments binaires présentant des valeurs BET entre 1000 et 1600 m²/kg, due à l'influence des autres facteurs physiques et chimiques.

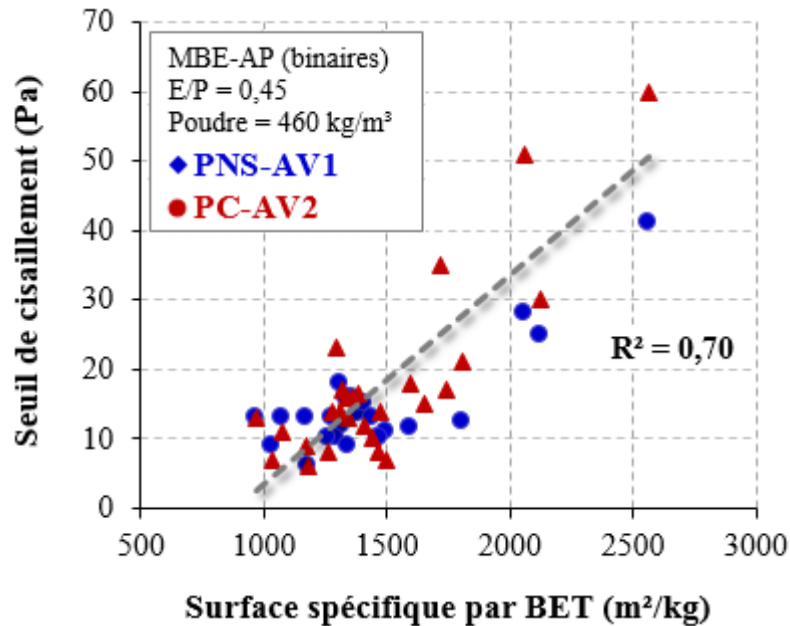


Figure 6.1 Relation entre la surface spécifique et le seuil de cisaillement des MBE-AP

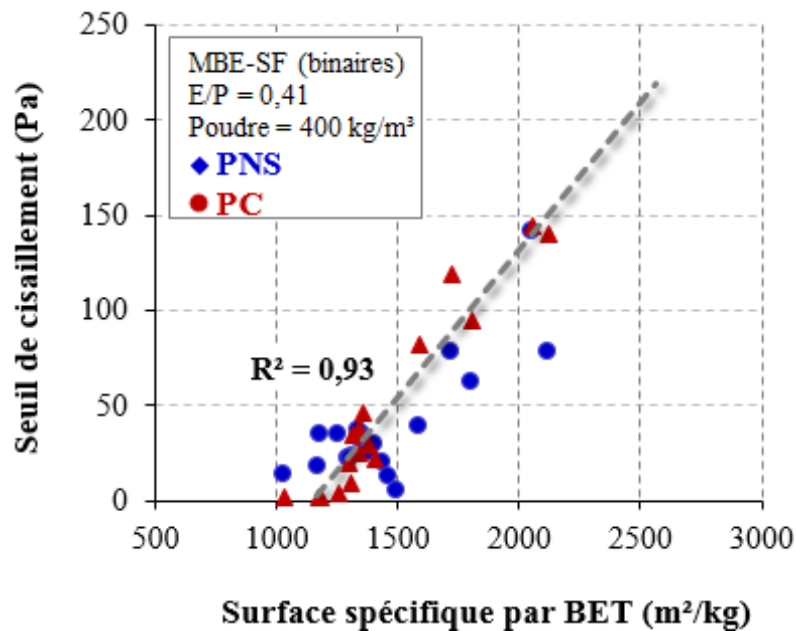


Figure 6. 2 Relation entre la surface spécifique et le seuil de cisaillement des MBE-SF

Par ailleurs, dans cette étude aucun lien n'a pu être établi entre la viscosité plastique des MBE et la surface spécifique des AM utilisés, qui est probablement dû être masqué probablement par un effet plus prépondérant comme la morphologie de ces poudres.

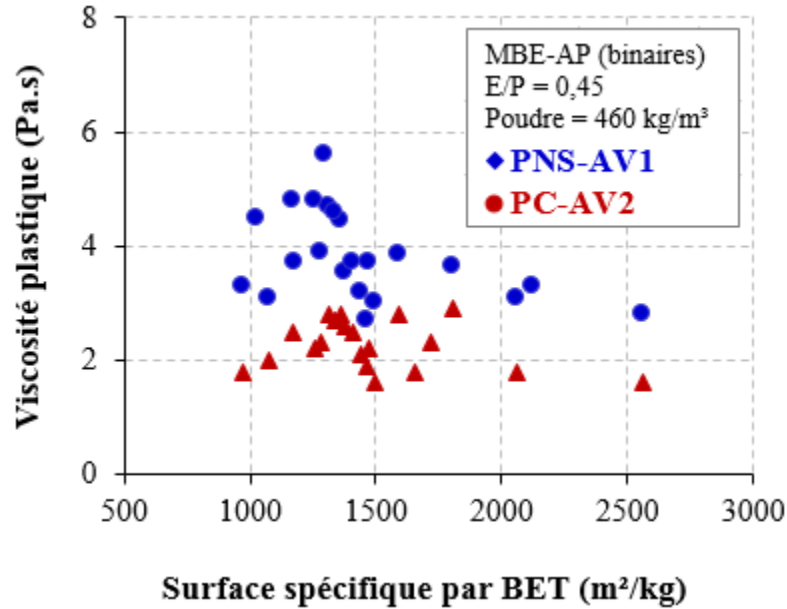


Figure 6. 3 Relation entre la surface spécifique et la viscosité plastique des MBE-AP

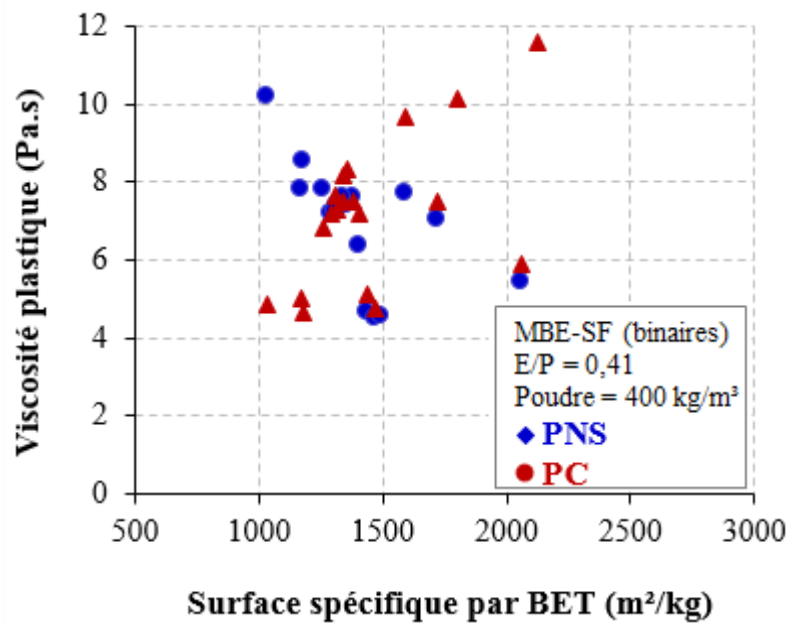


Figure 6.4 Relation entre la surface spécifique et la viscosité plastique des MBE-SF

6.3 EFFET DE LA DISTRIBUTION GRANULOMÉTRIQUE DES AM ET DES FILLERS SUR LES PROPRIÉTÉS RHÉOLOGIQUES DES MBE

Il est bien connu que la granulométrie du ciment et des poudres influencent les propriétés des systèmes cimentaires à l'état frais et durci. Plusieurs recherches se sont intéressées à ce sujet sous différents aspects. Il s'agit ici d'étudier l'influence de la distribution granulométrique des AM et des fillers calcaires sur les propriétés rhéologiques des MBE-AP et des MBE-SF. De nombreux modèles sont proposés pour représenter la distribution granulométrique des poudres, les plus utilisés sont la distribution de Rosin-Rammler et la distribution de Gates-Gaudin-Schuhmann [Outel, 2011; Pusica et coll., 2011].

La distribution de Rosin-Rammler est bien adaptée pour les matériaux broyés et concassés et la plus connue dans l'exploitation minière et du ciment [Lee et coll., 2003; Djamarani et coll., 1997]. De plus, c'est la distribution la plus adéquate pour les granulométries larges avec des particules fines car l'erreur induite est plus petite [Huiwen et coll., 2003]. De ces faits, ce modèle a été choisi dans cette étude pour décrire la distribution granulométrique du ciment combiné à tour de rôle avec les AM à différents taux de remplacement (les taux déjà adoptés dans les ciments binaires). La fonction de Rosin-Rammler est décrite par l'équation (6.1):

$$R(D_p) = 100 \exp[-(D_p/D_e)^n] (\%) \quad (6.1)$$

où $R(D_p)$ est le pourcentage des retenus cumulés en masse (ou en volume),

D_p est le diamètre des particules correspondant,

D_e est une constante liée à la taille des particules,

n est le coefficient d'uniformité (ou indice de la forme de la courbe) qui fournit une mesure de la raideur de la courbe. Plus la valeur de n est petite plus la distribution est étalée.

Les Coefficients n et D_e sont déterminés en utilisant l'ajustement non-linéaire par la méthode des moindres carrés. Les valeurs de n et de D_e sont utilisées comme des paramètres initiaux, le pourcentage des retenus cumulés (R) est défini comme une variable dépendante et le diamètre des particules (D_p) comme une variable indépendante. Un calcul itératif est effectué jusqu'à ce que la somme des carrés des déviations soit minimale.

Le tableau 6.1 récapitule les résultats obtenus des valeurs de n et D_e des systèmes binaires étudiés avec les propriétés rhéologiques des MBE respectifs. Généralement, les pourcentages des retenus obtenus par le modèle Rosin-Rammler en utilisant l'ajustement non-linéaire par la méthode des moindres carrés sont proches des retenus réels des systèmes binaires étudiés. Ceci se traduit par un faible χ^2/DoF (tableau 6.1). Des exemples sont illustrés sur les figures 6.5 à 6.7 pour les systèmes : 100% de ciment, 50% de ciment + 50% de L120 et 93% de ciment + 7% de MK, respectivement, qui montrent le degré de rapprochement entre les valeurs réelles et les valeurs ajustées.

Dans certain cas, les pourcentages des retenus obtenus par ajustement semblent plus éloignés des valeurs réelles, ce qui se traduit par des valeurs de χ^2/DoF de plus en plus importantes. C'est le cas de la CV-F, CV-C et le filler calcaire CC3 (figures 6.8 et 6.9 et tableau 6.1). Comme déjà stipulé au paragraphe 4.1.2 du chapitre 4, les deux cendres volantes présentent des granulométries bimodales (Figure 4.1), ce qui rend l'ajustement du modèle de Rosin-Rammler difficile avec l'augmentation de leur taux de remplacement. En effet, la valeur de χ^2/DoF varie de 2,7 à 9,84 pour 10% CV-C + 90% Ciment et 40% CV-C + 60% Ciment et de 3,08 à 13,95 pour 10% CV-F + 90% Ciment et 40% CV-F + 60% Ciment, respectivement (tableau 6.1). Pareillement pour le filler calcaire CC3, la valeur de χ^2/DoF varie de 2,43 à 33,99 pour 10% CC3 + 90% Ciment et 40% CC3 + 60% ciment, respectivement. Ce manque d'ajustement est dû à la granulométrie très étroite et uniforme que ce fillers présente (Figure 4.1). Le MK présente aussi une granulométrie très étroite mais vu que le pourcentage utilisé en MK est entre 2% à 7%, les courbes granulométriques ajustées sont bien proches des courbes granulométriques réelles.

Comme déjà stipulé, la distribution granulométrique selon le modèle de Rosin-Rammler est caractérisée par le coefficient d'uniformité n , qui donne une indication sur la raideur de la courbe granulométrique. Les figures 6.10 à 6.13 représentent une tentative pour lier les résultats du seuil de cisaillement des MBE à la valeur de n des différents AM utilisés dans la fabrication des MBE-AP et des MBE-SF.

Tableau 6.1 Récapitulatif des paramètres de l'ajustement de la distribution Rosin-Rammler et des propriétés rhéologiques des MBE

AM	Taux (%)	n	D_e	χ^2/DoF	R^2	MBE-AP				MBE-SF			
						PNS		PC		PNS		PC	
						τ_0 (Pa)	μ_{pl} (Pa.s)	τ_0 (Pa)	μ_{pl} (Pa.s)	τ_0 (Pa)	μ_{pl} (Pa.s)	τ_0 (Pa)	μ_{pl} (Pa.s)
REF	0	0,946	16,52	1,3	1,00	13,5	3,55	16,5	2,60	25	7,58	29,0	7,51
CV-F	10	0,884	16,54	3,08	1,00	16,0	4,20	16,0	2,80	35	7,40	46,0	8,34
	20	0,822	16,55	5,93	1,00	16,0	4,40	16,0	2,80	32,6	7,40	38,0	8,16
	30	0,763	16,54	9,63	0,99	12,0	4,60	17,0	3,20	23	7,40	34,0	7,30
	40	0,708	16,50	13,95	0,99	10,0	5,60	23,0		22	7,20	20,0	7,20
CV-C	10	0,908	16,29	2,70	1,00	15,0	3,70	12,0	2,50	29,01	6,36	22,0	7,20
	20	0,870	16,04	4,58	1,00	13,0	3,20	10,0	2,10	19,48	4,64	4,9	5,14
	30	0,833	15,78	6,99	0,99	10,0	2,70	8,0	1,90	12,28	4,48	1,7	4,77
	40	0,796	15,51	9,84	0,99	11,0	3,00	7,0	1,60	4,88	4,56	-	-
L100	10	0,964	16,28	1,61	1,00	18,0	4,70	14,0	2,80	22	7,25	9,0	7,65
	30	1,002	15,80	1,66	1,00	13,0	4,80	9,0	2,50	17,6	7,83	1,6	5,00
	50	1,045	15,34	1,88	1,00	9,0	4,50	7,0		13	10,18	1,3	4,84
L120	10	0,960	15,87	1,21	1,00	9,0	4,60	13,0	2,70	37	7,59	25,0	7,50
	30	0,994	14,62	0,72	1,00	10,0	4,80	8,0	2,20	34	7,80	3,5	6,82
	50	1,038	13,47	0,58	1,00	6,0	3,70	6,0		32	8,54	2,1	4,66
CC35	10	0,920	17,03	1,59	1,00	13,0	3,90	14,0	2,30	-	-	-	-
	30	0,872	18,14	1,50	1,00	13,0	3,10	11,0	2,00	-	-	-	-
	40	0,850	18,74	1,61	1,00	13,0	3,30	13,0	1,80	-	-	-	-
CC3	10	0,899	14,71	2,43	1,00	10,0	3,70	14,0	2,20	-	-	-	-
	30	0,919	10,77	19,58	0,99	8,0	3,10	15,0	1,80	-	-	-	-
	40	0,972	9,00	33,99	0,98	7,0	2,90	17,0		-	-	-	-
FS	2	0,895	16,07	0,93	1,00	11,5	3,30	35,0	2,30	77,78	7,03	118,8	7,50
	4	0,846	15,59	1,75	1,00	12,5	3,10	51,0	1,80	141,18	5,43	144,7	5,88
	7	0,777	14,82	2,95	0,99	16,0	2,80	60,0	1,60	--	--	--	--
MK	2	0,945	16,18	1,01	1,00	25,0	3,85	18,0	2,80	38,34	7,70	82,0	9,65
	4	0,945	15,84	0,85	1,00	28,0	3,65	21,0	2,90	61,88	9,12	94,5	10,13
	7	0,945	15,33	0,88	1,00	41,0	4,40	30,0	3,80	77,91	10,41	140,0	11,60

(-) CC35 et CC3 ne sont pas utilisés pour ce type de MBE, (--) Impossible d'effectuer les mesures à cause du très grand seuil de cisaillement.

Les résultats trouvés montrent que l'effet de la granulométrie sur les propriétés rhéologiques dépend du type de l'AM/filler utilisé. Mais pour le même matériau, la tendance du seuil de cisaillement est unique pour les deux types de MBE étudiés, mais pour la viscosité plastique aucun lien n'a pu être fait. En effet, d'un côté, l'augmentation du taux de remplacement du ciment soit par la CV-F, CV-C ou les CC35 a engendré une diminution dans la valeur du coefficient d'uniformité n , ce qui signifie que la courbe granulométrique devient plus étalée. Dans ce cas, la diminution dans la valeur de n correspond à une augmentation de la fluidité des deux types de MBE (Figures 6.10 à 6.13).

Ces résultats se concordent avec ceux trouvés par Lee et coll. (2003), qui ont étudié la fluidité des pâtes de ciment fabriquées avec des CV-F avec différentes granulométries. Les auteurs ont trouvé que la fluidité des pâtes de ciments augmente lorsque la granulométrie est plus étalée, c.-à-d. lorsque la valeur de n diminue.

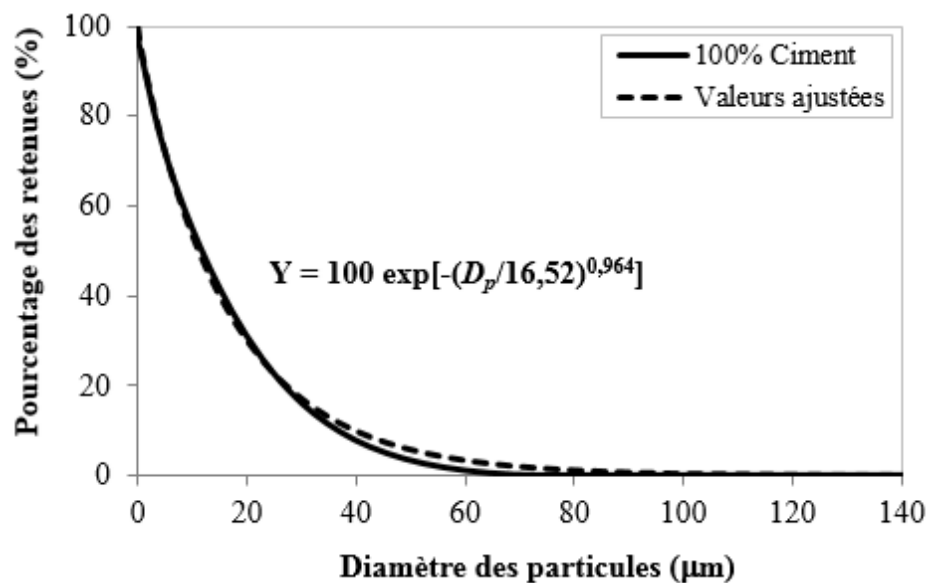


Figure 6.5 Représentation de la distribution granulométrique réelles et celle obtenues par ajustement non-linéaires du modèle Rosin-Rammler pour 100% ciment

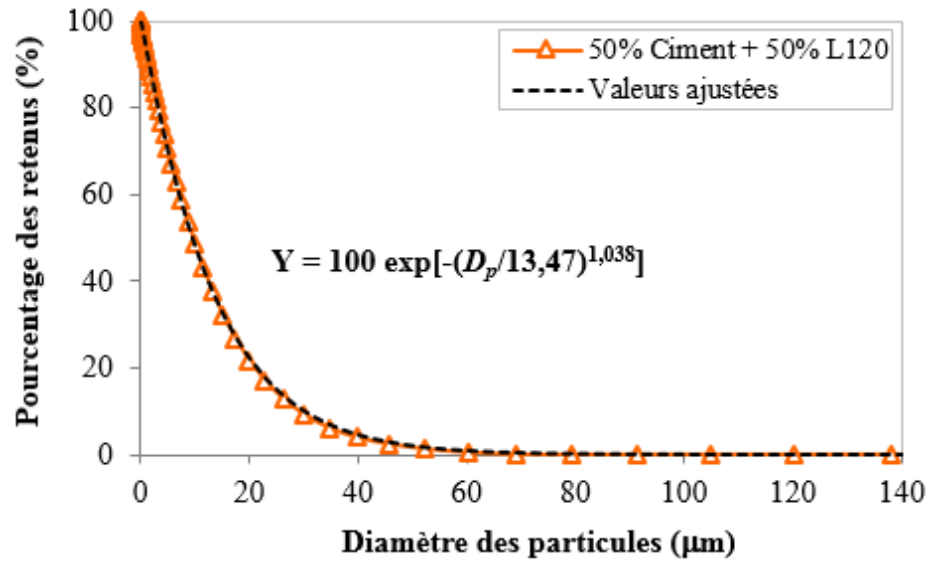


Figure 6.6 Représentation de la distribution granulométrique réelles et celle obtenues par ajustement non-linéaires du modèle Rosin-Rammler pour 50% ciment + 50% L120

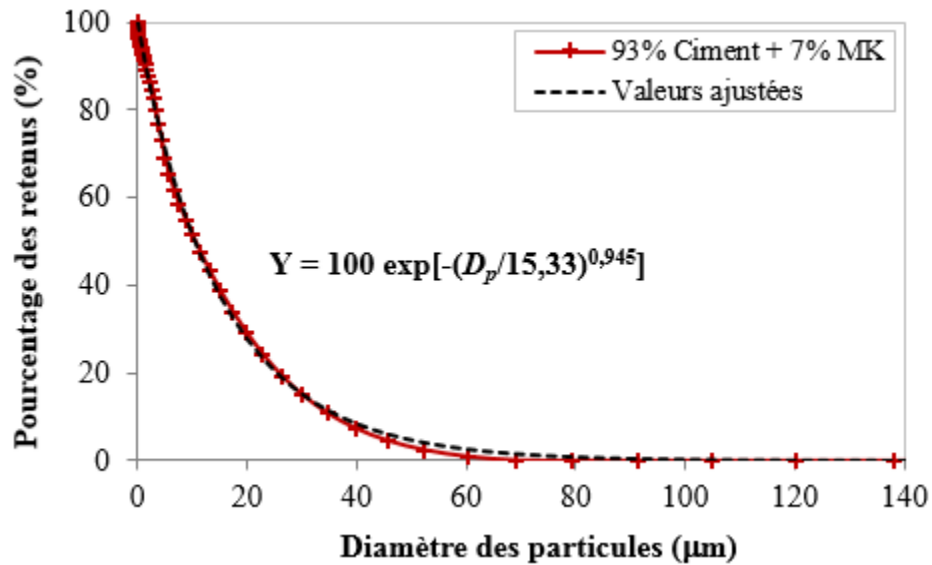


Figure 6.7 Représentation de la distribution granulométrique réelle et celle obtenue par ajustement non-linéaire du modèle Rosin-Rammler pour 93% ciment + 7% MK

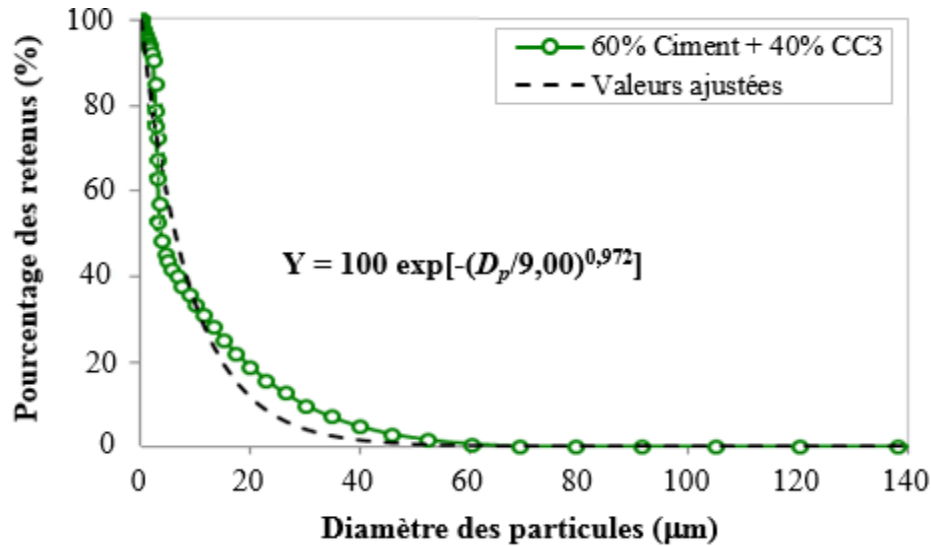


Figure 6.8 Représentation de la distribution granulométrique réelle et celle obtenue par ajustement non-linéaire du modèle Rosin-Rammler pour 60% ciment + 40% CC3

De l'autre côté, l'augmentation du taux de remplacement en L100 ou L120 a donné des courbes granulométriques peu étroites par rapport à celle du ciment, ce qui s'est traduit par l'augmentation de la valeur de n . Dans ce cas, cette augmentation correspond à une amélioration de la fluidité des deux types de MBE et avec les deux cas des adjuvants utilisés. Là aussi, Wan et coll. (2004) ont étudié l'effet des caractéristiques du laitier sur les propriétés des mortiers. Les auteurs ont trouvé que pour une même surface spécifique de laitier, une granulométrie étroite de ce dernier correspond à une fluidité plus importante du mortier.

Toutefois, il peut être admet que plus la distribution granulométrique des poudres est étalée, plus il y a un meilleur réarrangement inter-particulaire qui donne une meilleure compacité, diminuant ainsi la demande en eau et améliorant la fluidité des MBE. Mais il y a d'autres facteurs, comme les propriétés physico-chimiques, l'état de surface, la forme des particules et la finesse, qui peuvent influencer différemment et masquer latéralement l'effet de la nature de la distribution granulométrique. Ceci a été très visible dans le cas de la FS. L'augmentation du taux de remplacement de 0% à 7% de ciment par la FS a engendré une diminution du coefficient d'uniformité de 0,946 à 0,777 ce qui correspond à une granulométrie peu étalée grâce aux particules nanométrique de la FS. La diminution de la valeur de n correspond à une détérioration de la fluidité des MBE mais cette détérioration est causée principalement par l'importante surface

spécifique de la FS. Il est alors évident que l'effet de la distribution granulométrique est lié principalement à la nature des poudres et qu'il paraît ambigu de justifier ou encore d'en tirer des conclusions vis-à-vis cet effet sur les propriétés rhéologiques des MBE.

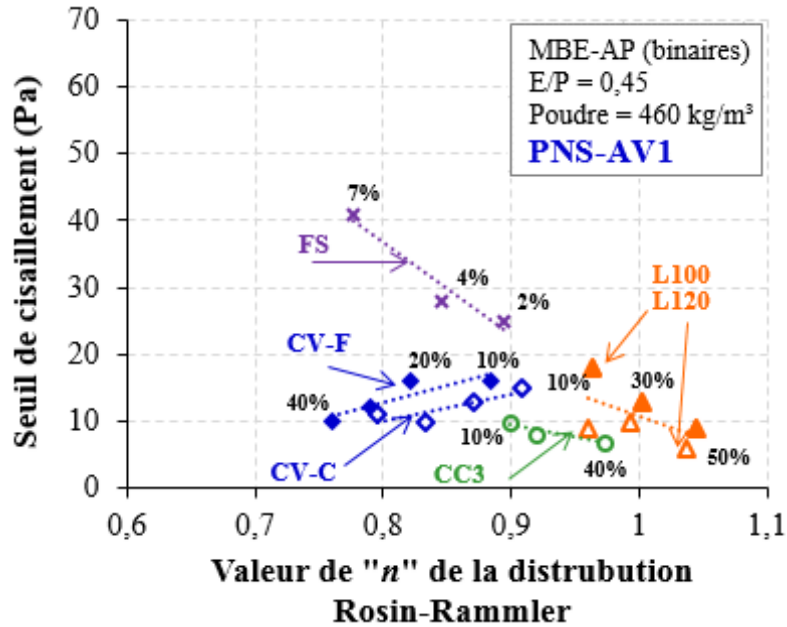


Figure 6.9 Effet de la distribution granulométrique des AM et des fillers sur le seuil de cisaillement des MBE-AP en présence de PNS-AV1

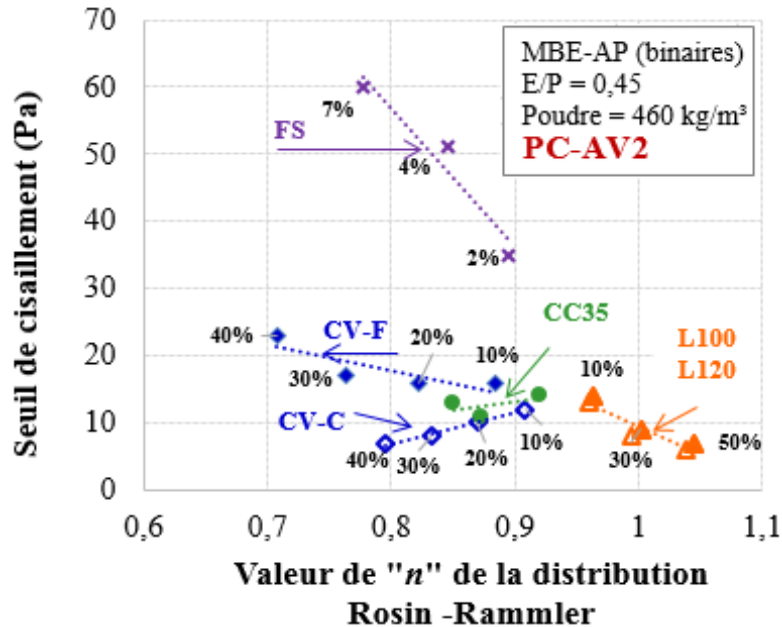


Figure 6.10 Effet de la distribution granulométrique des AM et des fillers sur le seuil de cisaillement des MBE-AP en présence de PC-AV2

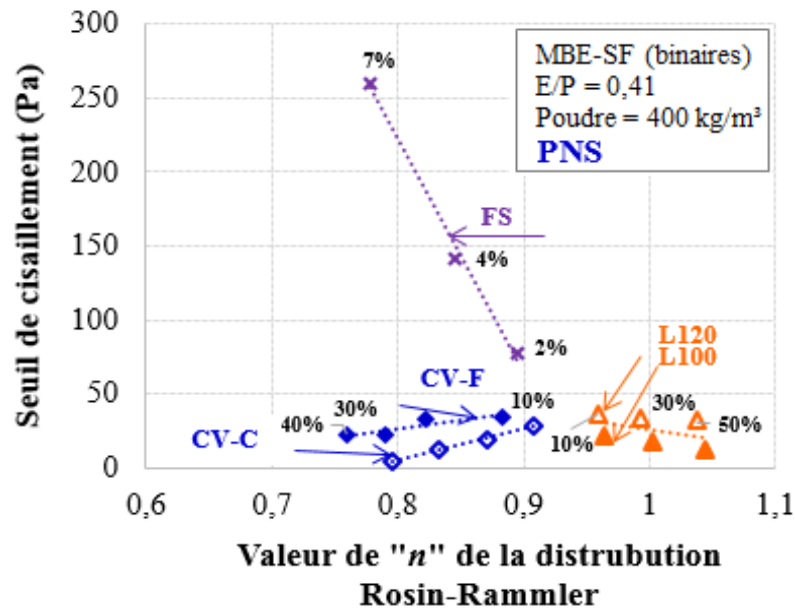


Figure 6.11 Effet de la distribution granulométrique des AM sur le seuil de cisaillement des MBE-SF en présence de PNS

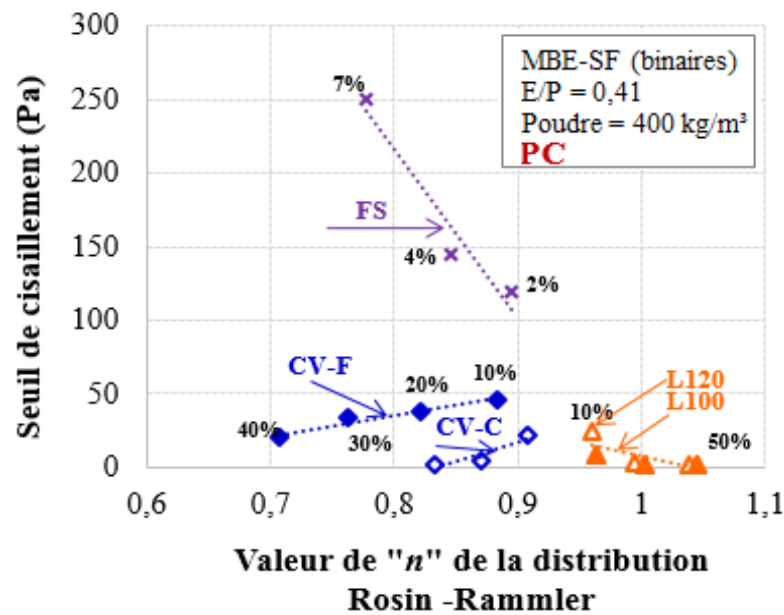


Figure 6.12 Effet de la distribution granulométrique des AM sur le seuil de cisaillement des MBE-SF en présence de PC

6.4 EFFET DE LA FORME DES PARTICULES DES AM ET DES FILLERS SUR LES PROPRIÉTÉS RHÉOLOGIQUES DES MBE

La plupart des poudres utilisées dans l'industrie du béton sont des sous-produits industriels ou des matériaux traités au minimum par broyage. L'historique de ces matériaux a une influence importante dans la définition de la forme des particules. Tout comme la surface spécifique et la distribution granulométrique, la morphologie des particules a une contribution sur l'état de la compacité des particules qui est parmi les principaux facteurs qui contrôlent la capacité d'écoulement des systèmes cimentaires fluides.

Généralement, la description de la forme des particules fait référence à des facteurs appelés "facteurs de forme" ou "indices de forme". Ces facteurs sont des grandeurs sans dimension mesurées par analyse d'imagerie et par microscopie. La forme des particules a une grande importance puisque différents secteurs industriels utilisent ces facteurs pour estimer l'évolution d'une production industrielle donnée. Dans la littérature, il existe plusieurs facteurs de formes permettant de caractériser la morphologie des particules dont les plus connus sont : le facteur elliptique, le facteur de Ferret et le facteur circulaire. La définition de chaque facteur est illustrée sur la figure 6.14.

Dans cette étude, le facteur de forme de Ferret est utilisé pour décrire la morphologie des particules. Ce facteur donne une indication sur l'allongement et la circularité des particules. Plus le facteur est petit, plus la forme est allongée; et plus le facteur est grand, plus la forme est circulaire. Les différentes formes sont définies comme suit [Westerholm, 2006] :

- $0 \leq F\text{-Ferret} < 0.25$: très allongée
- $0.25 \leq F\text{-Ferret} < 0.50$: allongée
- $0.50 \leq F\text{-Ferret} < 0.75$: cubique
- $0.75 \leq F\text{-Ferret} \leq 1$: circulaire

De plus, les images obtenues par le MEB sont exploitées visuellement afin d'apporter une description qualitative plus détaillée sur la forme des particules selon l'échelle de Power (1953), tel que l'angularité ou la rondeur comme c'est indiqué sur la figure 6.15.

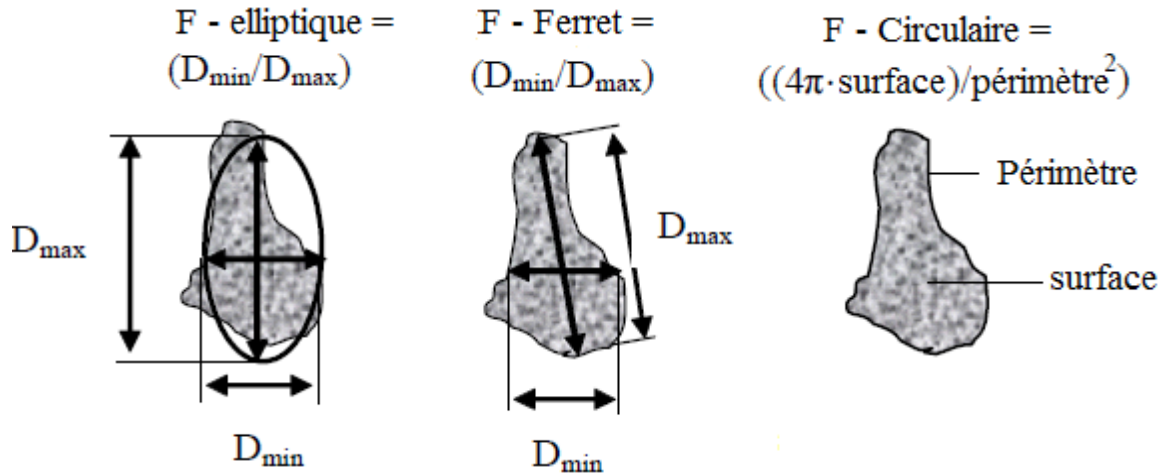


Figure 6.13 Définition des différents facteurs de formes [Wasterholm, 2006]

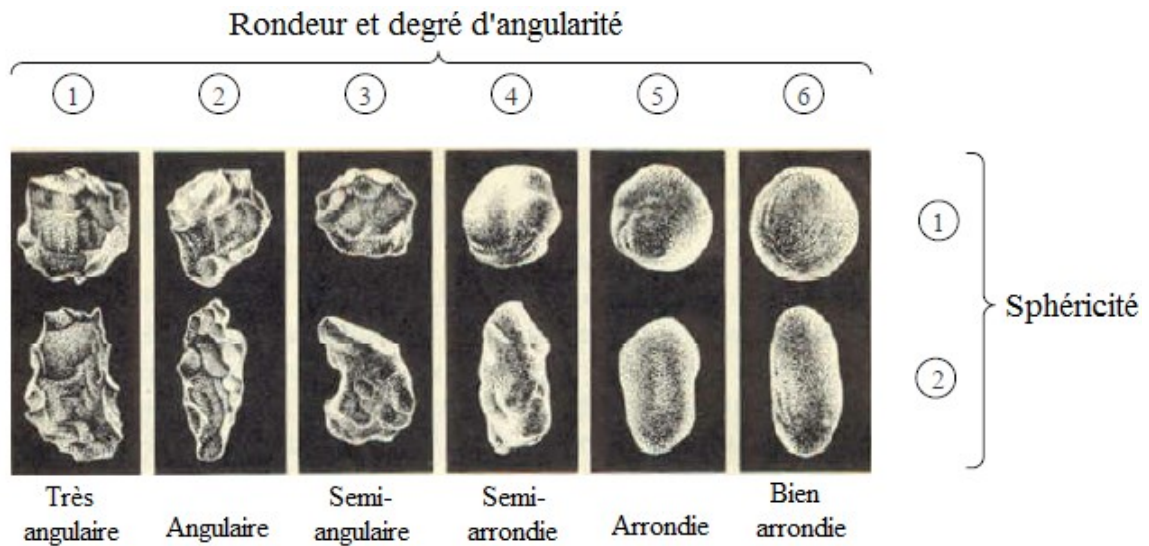


Figure 6.14 Échelle de rondeur selon Power (1953) [Hunger, 2010]

Le tableau 6.2 résume le facteur de forme de la grande popularité des particules observées par le MEB. Il est évident que c'est une façon plus qualitative que quantitative. Néanmoins, c'est la meilleure façon qui a été jugée adéquate, dans le cadre de cette étude, selon les moyens disposés et vu que les poudres étudiées ne sont pas déviées d'une même origine.

Les figures 6.16 à 6.19 présentent une corrélation entre la forme des particules des poudres utilisées (exprimée par le facteur de Ferret) et les propriétés rhéologiques des MBE-AP et MBE-SF pour les deux cas de SP étudiés. Le facteur de forme pour chaque type de poudre est

attribué aux propriétés rhéologiques du MBE qui contient cette poudre avec le pourcentage de remplacement maximal. Le but est de comparer s'il existe un effet apparent de la forme des particules malgré la diversité des poudres (AM), des adjuvants (PNS, PC) et des consistances des MBE étudiés (autoplaçante et semi-fluide). Les résultats sont résumés sur le tableau 6.3.

Les résultats montrent, généralement, que pour les deux cas de MBE (MBE-AP et MBE-SF), il y a une bonne tendance entre la forme des particules et la viscosité plastique des MBE qui contiennent ces particules (figures 6.16 et 6.17). Plus la morphologie des particules est irrégulière et angulaire, plus la viscosité plastique est élevée; et plus les particules présentent une forme sphérique plus régulière, plus la viscosité plastique a tendance à diminuer. En effet, les MBE contenant des particules avec une forme angulaire allongée comme le ciment, CC35, L100 et le L120 ont présenté des viscosités plastiques plus importantes en comparaison avec les particules ayant une forme sphérique comme la CV-C et la FS. Dans le cas de MBE-AP, le remplacement de 7% de ciment par la FS a entraîné une diminution dans la viscosité de 22% en présence de PNS-AV1 et de 38% en présence de PC-AV2, comparativement aux mélanges de référence.

Tableau 6.2 Description de la forme des particules

AM	Facteur de Ferret	Forme des particules
Ciment GU	0,443	Angulaire allongée
CV-F	0,887	Sphérique
CV-C	0,969	Sphérique
CC35	0,516	Angulaire allongée plate
CC3	0,602	Cubique semi-arrondie
L100	0,421	Angulaire allongée
L120	0,487	Angulaire allongée
MK	0,525	Cubique semi-angulaire
FS	1,023	Sphérique

Tableau 6. 3 Récapitulatif du facteur de forme des ajouts minéraux et des propriétés rhéologiques des MBE

Taux de remplacement des poudres	Facteur de Ferret attribué	MBE-AP				MBE-SF			
		PNS-AV1		PC-AV2		PNS		PC	
		τ (Pa)	μ (Pa.s)	τ (Pa)	μ (Pa.s)	τ (Pa)	μ (Pa.s)	τ (Pa)	μ (Pa.s)
REF (100% ciment)	0,443	13,5	3,6	16,5	2,6	25,0	7,6	29,0	7,5
40% CV-F	0,843	10,0	5,6	23,0	4,0	22,0	7,2	20,0	7,2
40% CV-C	0,969	11,0	3,0	7,0	1,6	4,9	4,6	1,74	4,8
50% L100	0,421	9,0	4,5	7,0	1,8	13,0	10,2	1,3	4,8
50% L120	0,487	6,0	3,7	6,0	1,8	35,0	8,5	2,1	4,7
40% CC35	0,516	13,0	3,3	13,0	1,8	-	-	-	-
40% CC3	0,602	7,0	2,9	17,0	1,6	-	-	-	-
7% MK	0,515	16,0	4,4	30,0	3,8	77,8	10,4	94,0	10,1
7% FS	1,023	41,0	2,8	92,0	1,6	141,2	5,4	144,7	5,9

Il est admet généralement qu'une forme irrégulière non lisse des particules augmente leur résistance à se déplacer en comparaison avec les particules rondes et lisses, ce qui résulte en une viscosité plus élevée. Mais des exceptions peuvent avoir lieu, comme il a été constaté dans le cas de 40% CV-F en présence de PNS-AV1 et PC-AV2. Il est suspecté que la cause est liée à la présence de certaines particules irrégulières qui affectent l'interaction poudre-SP-AV (comme l'augmentation de l'adsorption du SP) d'autant plus que la présence de la CV-F a présenté des résultats inverses du point de vue seuil de cisaillement.

Par ailleurs, la corrélation entre la forme des particules et la viscosité plastique des MBE-SF a présenté une tendance un peu moins évidente (figure 6.17), mais qui correspond bien aux résultats trouvés pour MBE-AP. C'est-à-dire, plus le facteur de forme augmente, plus la viscosité plastique diminue. Pareillement au MBE-AP, des points extra sont notés. C'est le cas du L100 et L120, où la forme angulaire allongée n'a pas été un obstacle pour diminuer la viscosité plastique des MBE-SF en présence de PC-AV2. Ceci est éventuellement attribué fortement au fait qu'en présence de la combinaison PC-AV2, une augmentation remarquable de la fluidité est notée, ce qui peut être très favorable pour les particules vitreuses allongées qui s'auto-orientent facilement pour suivre la direction de l'écoulement. Par ailleurs, la corrélation entre la forme des particules et le seuil de cisaillement pour les deux types de MBE

(MBE-AP et MBE-SF) semble être masquée par d'autres effets prépondérants comme la surface spécifique et l'état de compacité du MBE (figures 6.18 et 6.19). Des résultats similaires ont été observés par Wasterholm (2006) où la corrélation entre la forme des particules fines (diamètre < 0,25 mm) et les propriétés rhéologiques semble être plus forte avec la viscosité plastique qu'avec le seuil de cisaillement des mortiers.

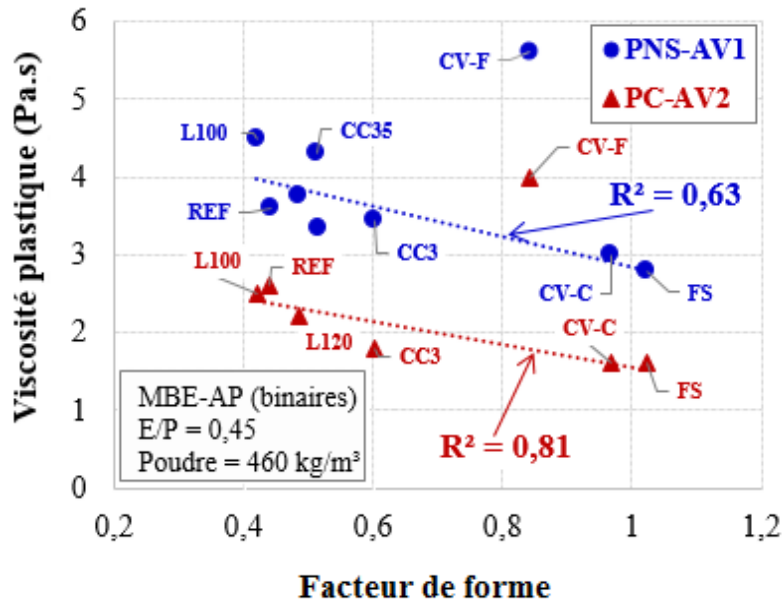


Figure 6.15 Relation entre la forme des particules et la viscosité plastique des MBE-AP

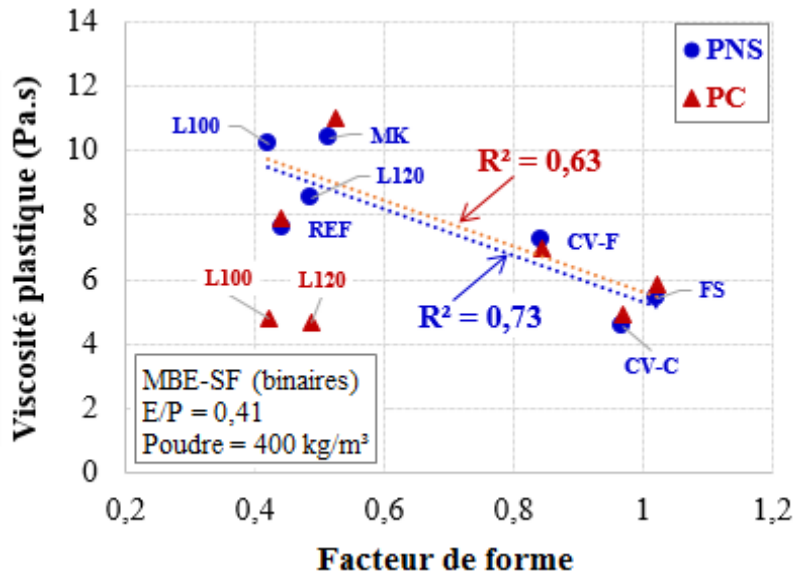


Figure 6.16 Relation entre le facteur de forme des particules et la viscosité plastique des MBE-SF

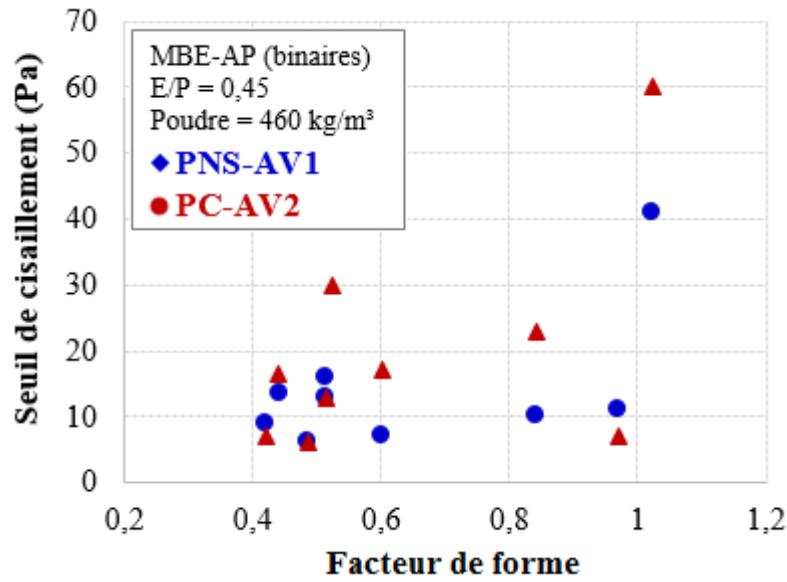


Figure 6.17 Relation entre la forme des particules et le seuil de cisaillement des MBE-AP

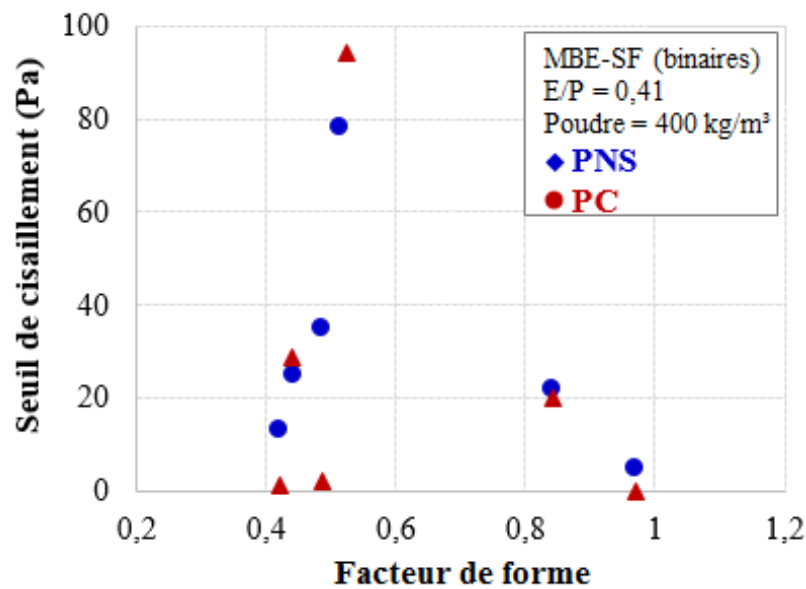


Figure 6.18 Relation entre la forme des particules et le seuil de cisaillement des MBE-SF

6.5 EFFET DES AM ET DES FILLERS SUR LA COMPACITÉ HUMIDE DES PÂTES DE CIMENT

La détermination de la compacité granulaires des poudres utilisées est très importante, puisque la compacité granulaire a une étroite relation avec les propriétés rhéologiques et la performance des milieux à matrices cimentaires. La compacité granulaire résultante de

l'utilisation des AM est grandement influencée par les différentes propriétés physiques et chimiques de ces poudres ainsi que par les adjuvants utilisés. Certaines études [Wang et coll., 1997; Wang et coll., 1999] ont montré qu'une distribution granulométrique étalée est plus avantageuse pour avoir une compacité granulaire élevée. Une compacité élevée peut augmenter la fluidité pour une demande en eau donnée et diminuer la demande en eau pour une consistance donnée.

Il existe plusieurs modèles qui proposent de déterminer la compacité granulaire des poudres [Yu et coll., 1997; Rassouly, 1999; Suzuki et coll., 2001]. Cependant, ces modèles sont applicables pour des systèmes binaires et ternaires en tant que des particules sèches. Contrairement aux sables et aux granulats, la mesure de la compacité granulaire des particules sèches avec la méthode de la masse volumique ne peut être faite pour les poudres ayant des particules inférieures à 100 μm [Paco, 2010] rapporté de [Fayed et coll., 1997]. Ceci est à cause des forces inter-particulaires de Van der Waals et des forces électrostatiques. En effet, ces forces peuvent causer l'agglomération des particules fines qui entraînent une augmentation du volume des vides [Yu et coll., 1997]. Par conséquent, la mesure de la compacité granulaire par la méthode sèche tend à surestimer le volume des vides et à sous-estimer la compacité des particules fines.

Par ailleurs, il existe d'autres méthodes expérimentales indirectes qui tentent de déterminer la compacité granulaire à partir de la demande en eau minimale nécessaire pour remplir les vides entre les solides. Plusieurs chercheurs ont proposé des méthodes pour mesurer cette demande en eau. Certains considèrent que la demande minimale en eau correspond à la quantité minimale d'eau pour produire une pâte lisse et épaisse. Une quantité légèrement inférieure produit un mélange semblable à une terre humide [Sedran et coll., 1994; De Larrard, 1999] alors que d'autres se basent sur les mesures de consistance selon la norme ASTM C 187 [Lange et coll., 1997; Jones et coll., 2003]. Ces méthodes négligent généralement la quantité d'air dans la pâte, ce qui peut engendrer une surestimation de la compacité granulaire.

Kwan et Wong (2008) ont développé une nouvelle méthode pour mesurer la compacité des matériaux cimentaires à l'état humide. La demande en eau correspondant une masse volumique maximale est recherchée, ainsi le volume des vides est minimal lorsque la

compacité maximale est atteinte [Wong et coll., 2008; Kwan et coll., 2008]. Cette méthode semble être plus convaincante et est utilisée dans le cadre de cette étude afin d'évaluer la contribution des poudres utilisées à améliorer l'état de compacité des deux types de MBE en présence de différents adjuvants.

6.5.1 Principe de la méthode de compacité humide

Dans le domaine des matériaux cimentaires, les mesures de la compacité à l'état humide peuvent s'avérer plus appropriées vu que la compacité est considérée comme la concentration maximale en solides du mélange solide-eau. De plus, les adjuvants chimiques qui entrent dans la fabrication des systèmes cimentaires peuvent être utilisés, ce qui reflète mieux la réalité. La méthode adoptée s'appuie sur les mesures de la masse volumique plutôt que sur les mesures de consistance. Ceci permet l'évaluation de la teneur des vides et la concentration en solides; la teneur en air est prise en compte systématiquement. Des pâtes sont confectionnées avec différents rapports volumiques E/P dans le but de trouver le rapport E/P optimal pour lequel le ratio des vides est minimal et la concentration en solides est maximale. La concentration maximale en solides qui se produit lorsque les particules solides sont bien compactées est prise comme la compacité granulaire [Wong et coll., 2008].

6.5.2 Méthode de malaxage et procédure de mesure

La procédure de malaxage est une étape cruciale dans cette méthode. Wong et coll. (2008) se sont basés sur le processus du phénomène d'agglomération pour développer une séquence de malaxage adéquate. En effet, Iveson et coll. (2001), expliquent que lors du malaxage des poudres avec l'eau, trois mécanismes se succèdent : mouillage et nucléation, consolidation et fusion et puis rupture et usure (figure 6.20). Pendant le mouillage et la nucléation, le liquide entre en contact avec les particules sèches et forme les premières structures agrégées. Les pores à l'intérieur des granules sont saturés mais les surfaces restent sèches. Par la suite, si la teneur en eau est assez élevée, l'eau en excès mouille immédiatement la surface des particules et le processus de consolidation et de fusion est très rapide, conduisant à la formation d'une suspension ou d'une pâte en peu de temps. Toutefois, lorsque la teneur en eau est faible, la fusion va dépendre en grande partie du processus d'essorage à l'eau, ce qui est en général très lent. Si le temps de malaxage n'est pas suffisant, le phénomène d'agglomération prend le

dessus. De ce fait, une durée de beaucoup plus longue est nécessaire pour former une pâte [Wong et coll., 2008]. Pour maîtriser ce problème, la procédure de malaxage proposée consiste à :

- 1- Peser les quantités nécessaires des poudres (ciment, AM), eau et adjuvants.
- 2- Homogénéiser les poudres ensemble à sec pendant 2 min.
- 3- Diviser la quantité totale des poudres et des adjuvants (SP et AV) en deux moitiés puis mettre la quantité quasi-totale en eau avec la première moitié des poudres, SP et AV dans un bol à malaxeur et mélanger à faible vitesse pendant 3 min. Laisser juste une petite quantité d'eau pour diluer la quantité restante de SP + AV.
- 4- Diviser la deuxième moitié des poudres, de SP et d'AV en quatre portions égales. Ensuite, ajouter une portion à la fois de poudres et d'adjuvants dans le malaxeur en mélangeant à chaque fois 3 min avec une faible vitesse avant de rajouter la portion suivante (figure 6.21-a).

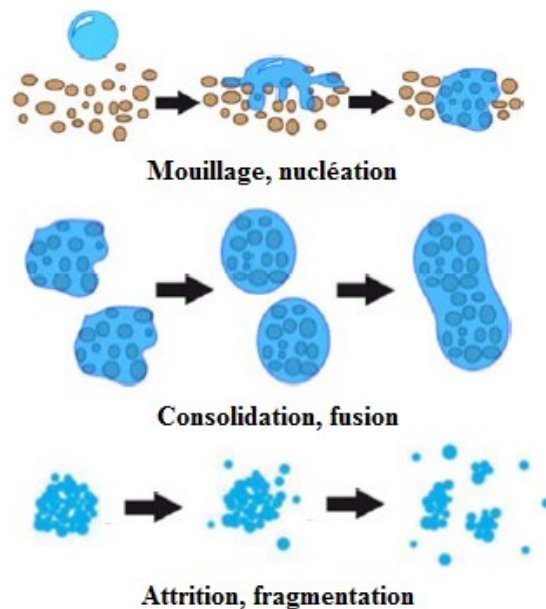


Figure 6.19 Processus d'agglomération selon l'approche Iveson et coll. (2001)

Une fois le malaxage terminé, un moule cylindrique de 211 ml est rempli jusqu'à l'excès. Une compaction par la table vibrante pendant 3 min est appliquée, plus de détails sur le temps de vibration sont présentés dans le paragraphe 6.4.4. Par la suite, la surface du moule est arasée à plat et la masse de la pâte est pesée (figure 6.21-b). Des mesures de consistance normale, selon

la norme ASTM C187, sont aussi faites en même temps afin d'établir un lien entre la consistance des pâtes et la compacité granulaire. Il s'agit de déterminer la distance de pénétration d'une sonde amovible, de 10 mm de diamètre, dans un moule tronconique rempli de pâte (figure 6.21-c).

Les étapes énumérées ci-haut sont répétées pour des rapports E/P successivement faibles jusqu'à l'obtention de la proportion des vides minimale. Généralement, pour atteindre le point optimal, 5 à 8 différents E/P sont à prévoir (figure 6.24).

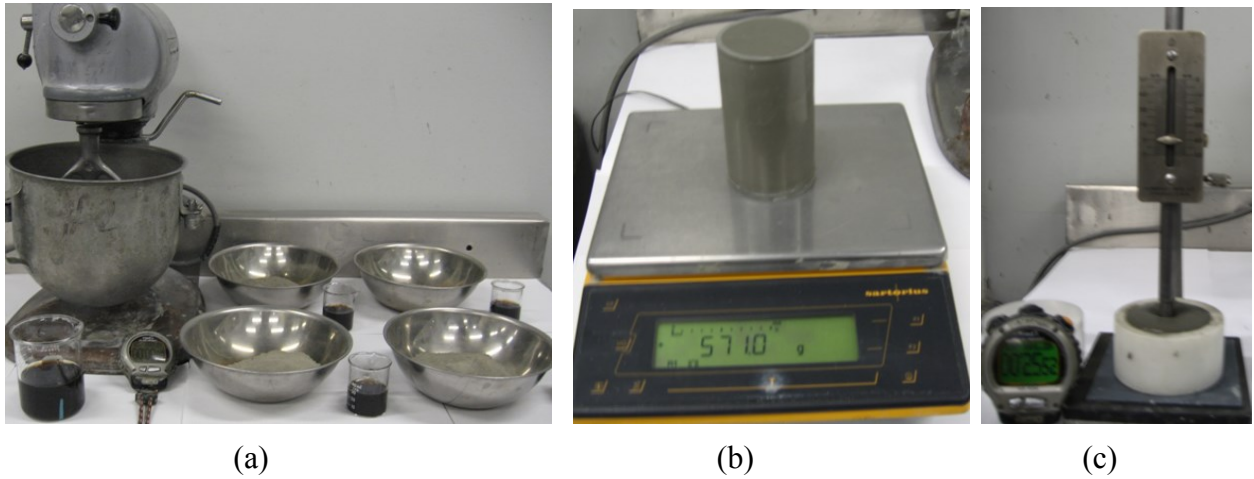


Figure 6.20 Procédure de mesure de la compacité granulaire (a) Préparation du mélange (b) Mesure de la masse (c) Mesure de la consistance

6.5.3 Calcul de la compacité granulaire

Le calcul des proportions des vides, de l'air et la concentration en solides est fait à partir des mesures de la masse volumiques apparente. Un contenant cylindrique de 211 ml de volume est utilisé pour cette dernière. La masse et le volume de la pâte dans ce contenant sont notés M et V , respectivement. Considérant que la matrice cimentaire se compose de différentes poudres notées α , β et γ . Les équations suivantes sont utilisées pour déterminer le volume des solides (V_s) et le volume d'eau (V_e) dans le contenant :

$$V_s = \frac{M}{\rho_e u_e + \rho_\alpha R_\alpha + \rho_\beta R_\beta + \rho_\gamma R_\gamma} \quad (6.2)$$

$$V_e = u_e V_s \quad (6.3)$$

où ρ_e est la densité de l'eau et u_e est le rapport E/P volumique. ρ_α , ρ_β et ρ_γ sont les densités des poudres α , β et γ . R_α , R_β et R_γ sont les proportions volumiques des poudres α , β et γ .

La proportion des vides (u_v), la proportion de l'air (u_a) et la concentration en solide (ϕ) sont déterminées par les équations suivantes :

$$u_v = (V - V_S)/V_S \quad (6.4)$$

$$u_a = (V - V_S - V_e)/V_S \quad (6.5)$$

$$\phi = V_S/V \quad (6.6)$$

La figure 6.22 représente la proportion des vides en fonction du rapport volumique E/P. Il existe un point optimal pour lequel la proportion des vides est minimale qui correspond à une compacité granulaire maximale. Les points qui se trouvent sur la bissectrice représentent les pâtes pour lesquelles le volume des vides est totalement rempli par l'eau. Mais plus le rapport E/P diminue, plus les pâtes deviennent moins fluides et la proportion d'air qui ne peut être éliminée par la compaction augmente.

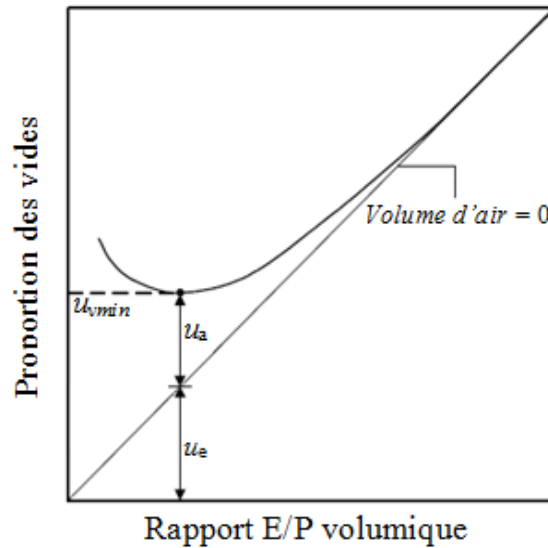


Figure 6.21 Proportion des vides en fonction du rapport volumique E/P
[Wong et coll., 2008]

6.5.4 Optimisation de la compaction

Dans le but d'uniformiser le mode de compaction pour tous les mélanges, une comparaison a été faite, dans un premier temps, entre différents modes de compaction à savoir : le mode sans

compaction, la compaction manuelle (remplissage en 2 couches avec 10 coups /couche) et la compaction moyennant la table vibrante. Dans le dernier mode de compaction, c.-à-d. par la table vibrante, le nombre nécessaire de couches pour une compaction optimale a été aussi testé. En un premier temps, la durée de la compaction a été maintenue 30 sec pour chaque couche, comme suggérée par Wong et Kwan (2008), sauf pour le cas de remplissage en une couche où une vibration de 60 sec est appliquée. Par la suite, la durée de compaction est testée dans le but d'avoir des résultats plus stables quelle que soit la consistance du mélange. La table vibrante utilisée est celle qui est habituellement utilisée pour la compaction des moules destinés aux tests de la résistance à la compression. La table fonctionne avec une fréquence de 60 Hz et une amplitude de 0,775 mm.

Le tableau 6.4 résume les résultats obtenus de la compacité granulaire pour les trois modes de compaction pour deux différents mélanges, chaque mélange est répété trois fois. De plus, une représentation de la variation de la proportion des vides avec le rapport E/P pour le mélange REF (PNS) avec les différents modes de compaction est illustrée sur la figure 6.23. Les résultats montrent que la plus faible compacité est obtenue lorsqu'aucune compaction n'est appliquée. Mais lorsqu'il s'agit d'une compaction manuelle, la compacité granulaire obtenue est la plus importante parmi les différents modes. Cependant, le coefficient de variation sur les trois répétitions est assez important à cause de la force appliquée lors de l'essai (5%). De plus, les résultats d'une compaction manuelle dépendent beaucoup de l'opérateur et de l'énergie appliquée. De ce fait, l'utilisation de la table vibrante semble être un choix plus adéquat pour ce genre de test. Wong et Kwan (2008) proposent de remplir le moule en 4 couches avec une vibration de 30 secs pour chaque couche. Le nombre nécessaire des couches pour avoir la meilleure compacité est déterminé et les résultats montrent que plus le nombre de couche augmente, plus le rapport E/P pour atteindre la compacité maximale augmente. Ce résultat est noté pour les deux mélanges étudiés REF (PNS) et 7% FS (PNS). En effet, pour le mélange REF (PNS), lorsque le moule est rempli en une seule couche, la compacité maximale obtenue est de 0,551 pour un rapport E/P de 0,55. Puis, pour un remplissage en deux couches, la compacité est presque pareille mais correspond à un rapport E/P de 0,60 et ce rapport est de 0,80 pour un remplissage en trois couches. Ceci apparait clairement sur la figure 6.24 qui montre que pour le mélange REF (PNS), le passage d'une couche de remplissage à 3 couches

fait que le point optimal de chaque courbe tend vers la bissectrice. Ceci signifie que l'augmentation du nombre de couche a pour conséquence d'augmenter la proportion des vides. Cette augmentation est de 14% entre 1 et 2 couches et 21% entre 1 et 3 couches.

À travers ces résultats, il semble que le remplissage du moule en une seule couche est plus approprié. Cependant, il est important de vérifier la durée de vibration nécessaire pour des résultats plus stables. Pour cela, des mesures de la masse de la pâte de ciment (7% FS-PNS) contenu dans le moule ont été faites pour différents temps de vibration (0 à 180 secs par palier de 30 secs). Ces mesures ont été faites pour les différentes consistances de la pâte de ciment (de fluides à ferme) en variant le rapport volumique E/P. Les résultats obtenus sont représentés sur la figure 6.24. Il est clair que plus le rapport E/P diminue, plus le temps de vibration nécessaire augmente, entraînant une augmentation de la masse de la pâte grâce au fait que l'air emprisonné lors du remplissage du moule est échappé par la vibration. Pour des mélanges un peu fluides, un temps de vibration de 60 sec est suffisant pour avoir la masse optimale. Mais pour des pâtes plus fermes, l'augmentation du temps de vibration de 60 sec à 180 sec peut augmenter la masse de la pâte à l'intérieur du moule jusqu'à 8%, ce qui signifie une augmentation de la compacité granulaire de 8%. La figure 6.24 montre bien que pour les différents rapports E/P, un temps de vibration de 180 sec donne des mesures de masse plus stables.

Tableau 6. 4 Comparaison entre les différents modes de compaction

Mode de compaction	Nombre de couches	Mélange	Compacité	Écart type	Coefficient de variation	E/P (volumique)
Aucune	-	REF (PNS)	0,429	0,031	3,1	0,600
		7% FS (PNS)	0,530	0,044	4,2	0,650
Manuelle	2 couches (10 coups/couche)	REF (PNS)	0,590	0,030	5,1	0,575
		7% FS (PNS)	0,578	0,027	4,7	0,620
Table Vibrante	1 couche (60 sec/couche)	REF (PNS)	0,551	0,011	1,9	0,550
		7% FS (PNS)	0,581	0,013	2,3	0,650
	2 couches (30 sec/couche)	REF (PNS)	0,555	0,022	4,0	0,600
		7% FS (PNS)	0,543	0,005	0,9	0,750
	3 couches (30 sec/couche)	REF (PNS)	0,553	0,005	0,9	0,800
		7% FS (PNS)	0,546	0,010	1,9	0,820
	1 couche (180 sec/couche)	REF (PNS)	0,572	0,003	0,5	0,600
		7% FS (PNS)	0,590	0,003	0,5	0,620

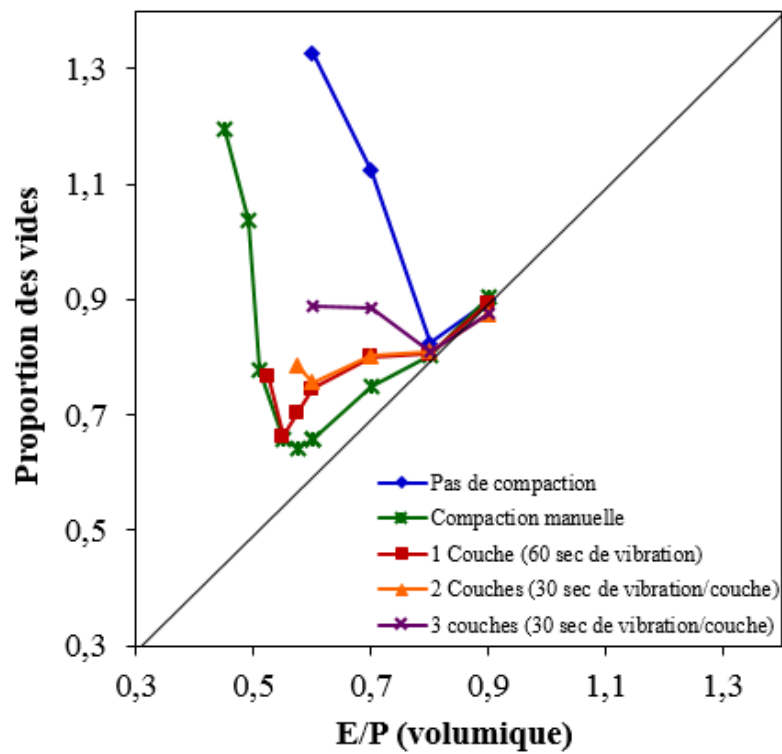


Figure 6.22 Effet du mode de compaction sur la proportion des vides

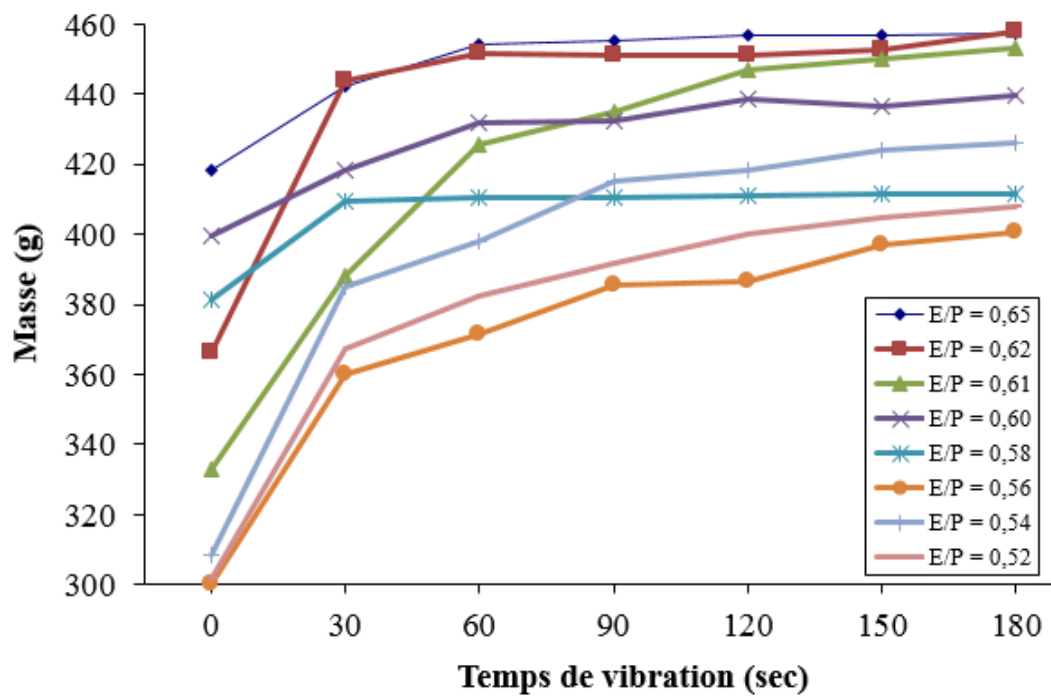


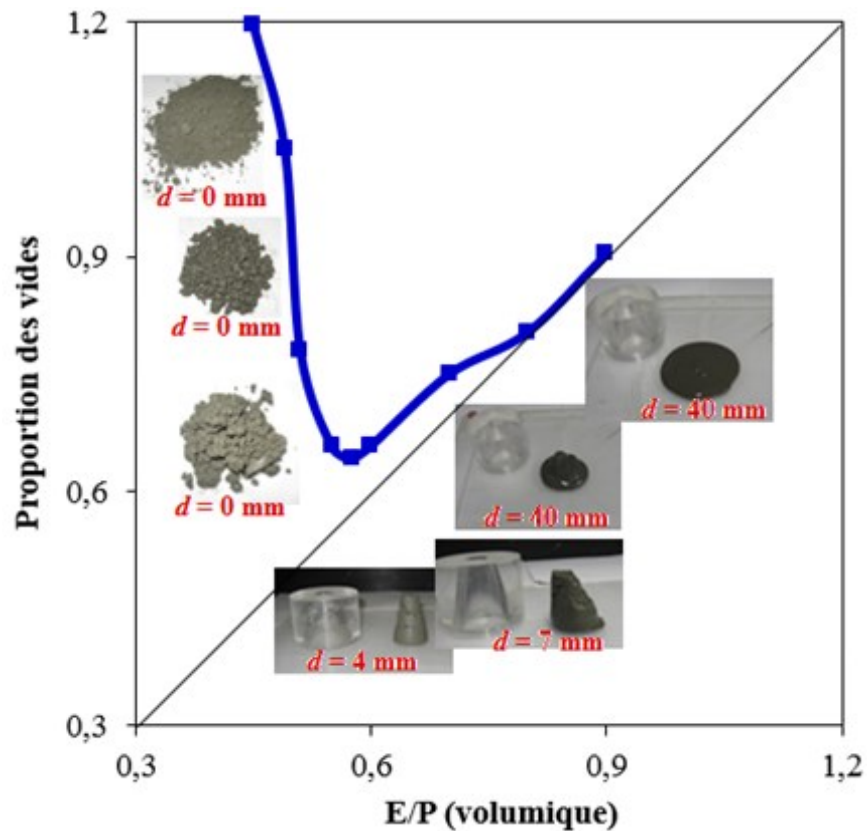
Figure 6.23 Optimisation du temps de vibration avec une couche de remplissage

6.5.5 Relation entre la compacité granulaire et la consistance de la pâte de ciment

La demande en eau minimale pour remplir les vides inter-particulaires a été longtemps considérée comme la clé de la mesure de la compacité granulaire maximale. Comme il a été déjà mentionné au début de la section 6.4, plusieurs auteurs ont tenté de définir cette quantité d'eau en passant par des mesures de demande en eau pour obtenir une pâte lisse ou à partir des mesures de consistance normale selon la norme ASTM C187. Cependant, la quantité d'air emprisonnée dans les mélanges est souvent négligée ce qui peut entraîner des erreurs dans le calcul de la compacité. Afin de mettre lumière sur le lien entre la consistance de la pâte et la compacité granulaire maximale, des mesures de consistance selon la norme ASTM C187 ont été faites parallèlement avec les mesures de la masse volumique pour un certain nombre de mélanges. D'après la norme ASTM C187, la pâte est considérée à consistance normale si la distance de pénétration (d) est de 10 ± 1 mm. Les résultats présentés sur le tableau 6.5 montrent que la consistance de la pâte pour une compacité maximale est vraisemblablement loin de la consistance normale définie par la norme ASTM C187. Un écart important dans les résultats de distance de pénétration est noté. En effet, la compacité maximale pour les mélanges REF (PNS-AV1) et 2% FS (PNS) correspond à des distances de pénétration de 7 mm alors que pour le mélange 25% L100 (PNS-AV1) cette distance est de 3 mm. Mais cet écart n'a pas un effet majeur sur la valeur correspondante de la compacité granulaire. La figure 6.25 donne un exemple sur les changements dans l'aspect de la pâte en fonction de la proportion des vides. Sur cette figure, il apparaît que la valeur de la proportion minimale des vides correspond bien à $d = 4$ mm, mais pour un $d = 7$ mm la proportion des vides est de 1% supérieure à celle de la valeur optimale. Par ailleurs, plusieurs mélanges ont présenté des consistances assez proches correspondantes à une distance de pénétration comprise entre 4 et 5 mm. Il peut être admis qu'une consistance de la pâte correspondant à une distance de pénétration de 5 ± 1 mm peut être attribuée à une compacité granulaire maximale et que, même si cette distance, pour certains mélanges, peut s'avérer plus ou moins importante, la répercussion sur la compacité granulaire maximale ne dépasse pas 1,5%.

Tableau 6. 5 Consistance des pâtes de ciment correspondant à la compacité maximale

Mélange	Compacité maximale	d (mm)	E/P
REF (PNS)	0,572	5	0,600
REF (PNS-AV1)	0,532	7	0,800
20% CVF (PNS-AV1)	0,562	5	0,680
40% CC3 (PNS-AV1)	0,601	6	0,650
25% L100 (PNS-AV1)	0,581	3	0,700
2% FS (PNS)	0,580	7	0,680
2% FS (PNS-AV1)	0,551	5	0,725
7% FS (PNS-AV1)	0,569	4	0,700
REF (PC)	0,614	5	0,525
REF (PC-AV2)	0,586	4	0,625
40% CC3 (PC-AV2)	0,600	4	0,600
20% CVF	0,591	4	0,625
2% FS (PC-AV2)	0,589	5	0,625
7% FS (PC-AV2)	0,603	4	0,580



6.5.6 Effet des AM et des fillers sur la compacité granulaire humide

Il s'agit de déterminer l'influence des différents AM sur la compacité granulaire humide des pâtes de ciment en présence des différents adjuvants chimiques (SP sans et avec la présence d'un AV). Dans un premier temps, les deux types de SP (PNS et PC) utilisés dans cette étude sont introduits à tour de rôle avec la quantité nécessaire d'eau. Puis dans un deuxième temps, l'effet de l'introduction d'un AV est testé en incorporant à tour de rôle les combinaisons PNS-AV1 et PC-AV2 avec la quantité nécessaire d'eau. Les dosages en SP et AV sont gardés les mêmes (en extrait sec par rapport à la masse de ciment) qui ont été utilisés dans l'étude des ciments binaires. Autrement dit, qu'en présence de SP seul, le dosage est le même que le dosage utilisé dans l'étude MBE-SF alors qu'en présence de la combinaison SP-AV, les dosages sont identiques à ceux utilisés dans l'étude des MBE-AP. Il est important de noter que les différents pourcentages des AM et des fillers utilisés dans l'étude de la compacité sont des pourcentages massiques. C'est un choix qui a été décidé prudent afin d'avoir une représentation réelle des ciments binaires étudiés dans le chapitre 5. Un facteur de correction prenant en considération la différence de volume est apporté dans le calcul du volume des solides (Eq 6.2).

Les figures 6.26 à 6.29 représentent la compacité humide maximale des pâtes de ciment contenant différents AM en présence de PNS, PC, PNS-AV1 et PC-AV2, respectivement. De plus, le tableau 6.6 présente un récapitulatif des pourcentages de remplacement de chaque AM/filler avec les résultats obtenus de la compacité maximale, la proportion des vides minimale ainsi que le rapport E/P (volumique) correspondant.

La première remarque constatée est que le remplacement partiel du ciment par n'importe quel AM/filler, en présence des différents cas d'adjuvants étudiés, a pour effet d'améliorer la compacité granulaire des pâtes de ciments. Un résultat lié au fait que chaque AM/filler possède une distribution granulométrique différente à celle du ciment, ce qui résulte à un meilleur réarrangement entre les particules entraînant une diminution de la proportion des vides et une augmentation de la compacité maximale. Cependant, certaines poudres peuvent avoir un effet plus considérable que d'autres. D'un côté, la poudre qui a performé par excellence dans l'augmentation de la compacité et avec les faibles taux de remplacement est le

MK. En effet, un remplacement jusqu'à 7% de MK a diminué la proportion des vides de 16%, 8%, 20% et 13% en présence de PNS, PC, PNS-AV et PC-AV2, respectivement, comparativement aux mélanges de référence (100% ciment). Ceci correspond à une augmentation de la compacité granulaire allant jusqu'à 7%, 3%, 10% et 6% en présence de PNS, PC, PNS-AV et PC-AV2, respectivement, en comparaison avec les mélanges de référence. De l'autre côté et contrairement à ce qui a été prévu, le remplacement partiel du ciment par la FS a résulté à une performance parfois proche et d'autres fois un peu plus faible à celle du MK. Des diminutions maximales dans les proportions des vides de 11%, 7%, 14% et 7% correspondants à des augmentations des compacités granulaires de 5%, 3%, 7% et 3% sont notées avec 7% de FS en présence de PNS, PC, PNS-AV1 et PC-AV2, respectivement, en comparaison avec les mélanges de référence (100% ciment). Wong et coll. (2008) ont noté qu'un remplacement volumique de 15% de ciment par la FS entraîne une importante diminution de la proportion des vides de 30% et une augmentation de 13% de la compacité granulaire. Par ailleurs, il a été noté que l'augmentation de la compacité granulaire avec les différents AM semble être moins importante en présence de PC ou encore PC-AV2 qu'en présence de PNS ou PNS-AV1. L'écart entre la compacité des mélanges de référence et la compacité maximale en présence de PNS et PNS-AV1 est de 14% et 17%, respectivement, alors qu'en présence de PC et PC-AV2 l'écart est de 8% et 10%, respectivement. Mais il faut souligner que les compacités des mélanges de référence (100% ciment) sont plus importantes en présence de PC (avec et sans AV2) que celles en présence de PNS (avec et sans AV1). Grâce au pouvoir dispersant qu'offre le SP à base de PC, le rapport E/P pour atteindre une proportion des vides minimale est beaucoup plus faible que celui avec le SP à base de PNS. En effet, les compacités maximales obtenues pour les mélanges de références sont de 0,577, 0,614, 0,532 et 0,586 correspondant à des rapports E/P respectifs de 0,620, 0,525, 0,800 et 0,625 en présence de PNS, PC, PNS-AV1 et PC-AV2. 12%, 4%, 13% et 3%, en comparaison avec les mélanges de référence et en présence de PNS, PC, PNS-AV1 et PC-AV2, respectivement. Par contre, avec 40% de CC3, l'augmentation de la compacité est de 14%, 8%, 17% et 10%, en comparaison avec les mélanges de référence et en présence de PNS, PC, PNS-AV1 et PC-AV2, respectivement. Ces résultats ne se sont pas concrètement reflétés au niveau de la fluidité, comme il a été constaté au niveau du seuil de cisaillement des MBE-AP,

où la présence des CC35 avec la combinaison PNS-AV1 n'a manifestement montré aucun effet (chapitre 5) dont les résultats ont été attribués à la faible capacité des PNS à disperser les particules de calcaire. Ceci n'a pas empêché les particules des fillers d'améliorer considérablement la compacité granulaire des pâtes. Ceci démontre que dans les mesures de compacité granulaire, les caractéristiques physiques des particules peuvent dépasser les interactions chimiques qui peuvent avoir lieu avec les adjuvants et vice versa, c.-à-d. l'amélioration de la compacité peut ne pas être un critère suffisant pour justifier l'augmentation de la fluidité.

Bien que les particules du filler CC35 soient beaucoup plus grossières que celles de CC3, le remplacement jusqu'à 40% de ciment par CC35 a résulté à des augmentations de la compacité de

Les meilleures améliorations de la compacité dues à l'utilisation de L100 ou L120 sont notées en présence de PNS et de PNS-AV1. En effet, l'augmentation de la compacité a atteint 7% et 9% avec 50% de L100 et 5% et 8% avec 50% de L120 en présence de PNS et de PNS-AV1, respectivement. De l'autre côté et en présence de PC et de PC-AV2, l'amélioration n'a pas dépassé 2% dans les meilleurs des cas. De plus, les deux laitiers ont présenté quasiment les mêmes compacités.

Ce qui est à noter aussi, est que la forme des particules n'a pas influencé significativement l'amélioration de la compacité. Certaines études [Sakai et coll., 1997] ont trouvé que les particules sphériques donnent une meilleure compacité granulaire par rapport aux particules concassées, du fait que la quantité d'eau retenue entre les particules sphériques est plus petite que celle retenue entre des particules concassées. Pourtant, les résultats ci-haut à l'échelle des poudres fines montrent bien que malgré sa forme cubique semi-angulaire, le MK a donné de meilleures compacités en comparaison avec la FS. Tandis qu'à l'échelle des poudres ayant une taille des particules proches à celle du ciment, la CV-F et la CV-C ont présenté des compacités granulaires légèrement plus importantes que celles des deux laitiers. Des augmentations de la compacité entre 9% et 11% sont notées en présence de PNS et PNS-AV1, alors qu'en présence de PC et PC-AV2 les augmentations ne dépassent pas 5% pour les deux cendres.

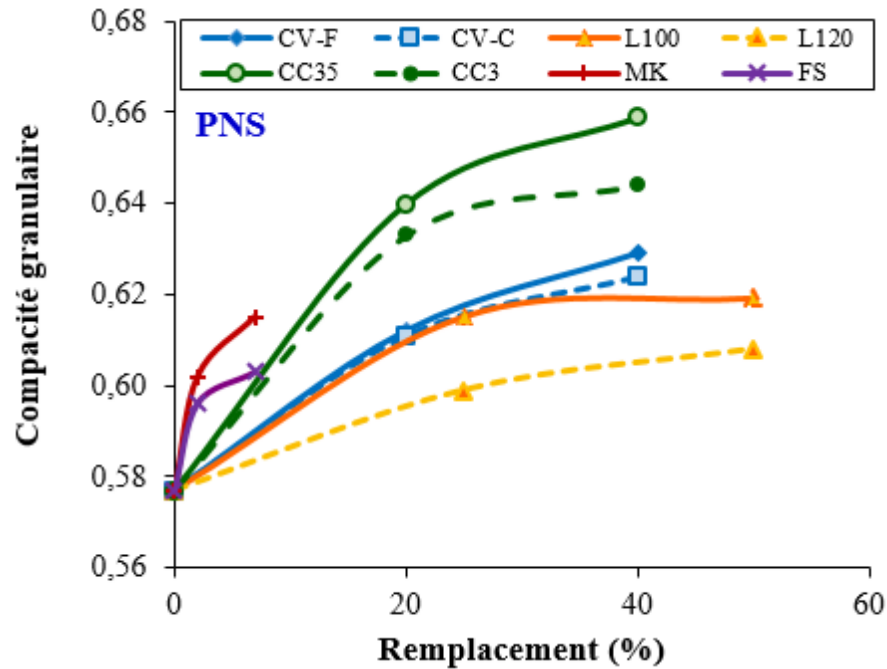


Figure 6.25 Influence des AM sur la compacité granulaire des pâtes avec PNS

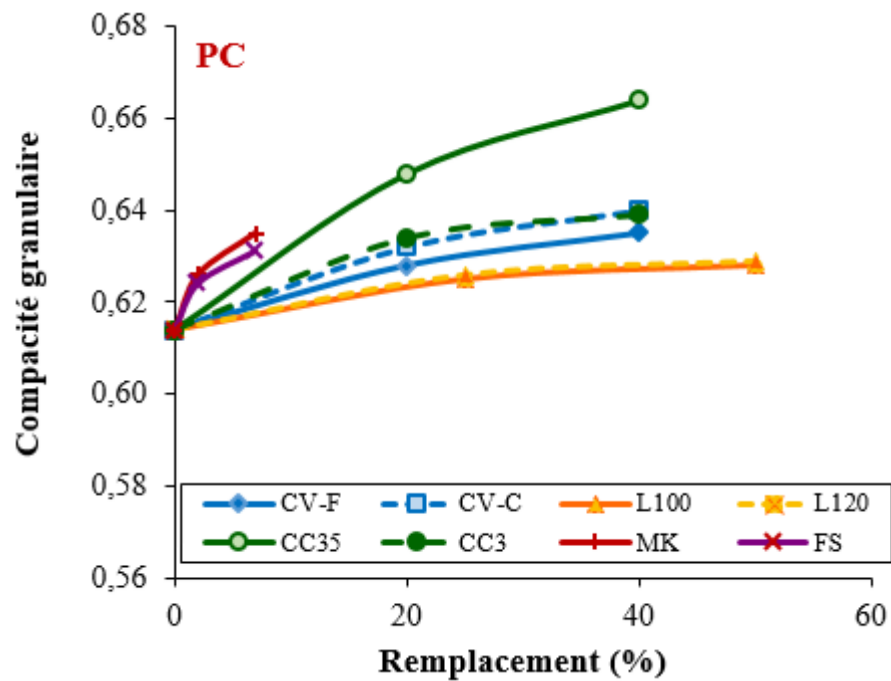


Figure 6.26 Influence des AM sur la compacité granulaire des pâtes avec PC

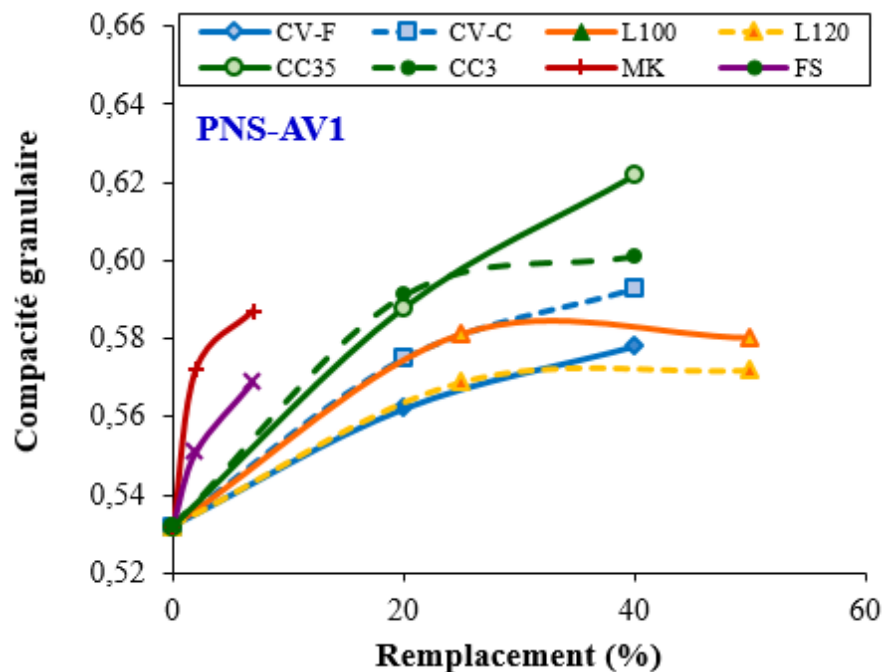


Figure 6.27 Influence des AM sur la compacité granulaire des pâtes avec PNS-AV1

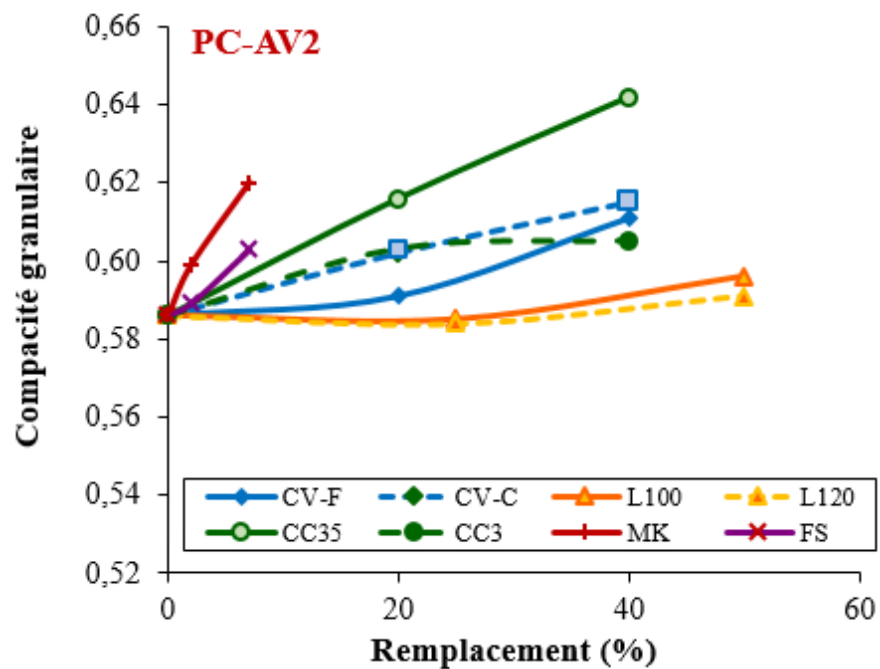


Figure 6.28 Influence des AM sur la compacité granulaire des pâtes avec PC-AV2

Tableau 6.6 Récapitulatif des résultats de la compacité granulaire maximale en présence des différents AM, fillers et adjuvants chimiques

Mélange	Remplacement (%)	PNS			PC			PNS-AV1			PC-AV2		
		u_{vmin}	Compacité	E/P	u_{vmin}	Compacité	E/P	u_{vmin}	Compacité	E/P	u_{vmin}	Compacité	E/P
REF	0	0,742	0,577	0,620	0,628	0,614	0,525	0,879	0,532	0,800	0,706	0,586	0,625
2% MK	2	0,661	0,602	0,620	0,597	0,626	0,525	0,748	0,572	0,680	0,669	0,599	0,625
7% MK	7	0,626	0,615	0,600	0,575	0,635	0,525	0,703	0,587	0,680	0,613	0,62	0,575
2% FS	2	0,678	0,596	0,640	0,603	0,624	0,525	0,814	0,551	0,725	0,697	0,589	0,625
7% FS	7	0,658	0,603	0,610	0,585	0,631	0,540	0,757	0,569	0,700	0,659	0,603	0,580
20% CC35	20	0,563	0,640	0,500	0,543	0,648	0,500	0,700	0,588	0,625	0,623	0,616	0,550
40% CC35	40	0,517	0,659	0,500	0,522	0,657	0,500	0,608	0,622	0,550	0,558	0,642	0,490
20% CC3	20	0,580	0,633	0,500	0,577	0,634	0,500	0,692	0,591	0,625	0,658	0,603	0,600
40% CC3	40	0,555	0,644	0,500	0,567	0,639	0,500	0,665	0,601	0,650	0,654	0,605	0,600
25% L100	25	0,626	0,615	0,580	0,600	0,625	0,510	0,721	0,581	0,700	0,709	0,585	0,625
50% L100	50	0,616	0,619	0,580	0,592	0,628	0,515	0,723	0,580	0,625	0,677	0,596	0,600
25% L120	25	0,669	0,599	0,600	0,597	0,626	0,510	0,757	0,569	0,700	0,712	0,584	0,625
50% L120	50	0,645	0,608	0,600	0,590	0,629	0,510	0,748	0,572	0,650	0,692	0,591	0,600
20% CV-F	20	0,634	0,612	0,540	0,592	0,628	0,520	0,778	0,562	0,680	0,692	0,591	0,600
40% CV-F	40	0,590	0,629	0,540	0,575	0,635	0,520	0,730	0,578	0,680	0,635	0,611	0,600
20% CV-C	20	0,637	0,611	0,540	0,582	0,632	0,500	0,710	0,575	0,640	0,661	0,602	0,570
40% CV-C	40	0,603	0,624	0,540	0,563	0,640	0,500	0,686	0,593	0,625	0,626	0,615	0,570

u_{vmin} est la proportion minimale des vides (voir figure 6.22)

6.5.7 Relation entre la compacité granulaire avec la surface spécifique et la taille moyenne des AM

Les relations entre la surface spécifique ainsi que la taille moyenne des particules d'un côté et la compacité granulaire de l'autre côté sont montrées sur les figures 6.30 à 6.33. Les résultats montrent que quel que soit le type de SP ou la combinaison SP-AV utilisé, les poudres présentant des surfaces spécifiques plus ou moins importantes sont généralement celles qui ont donné résultat aux meilleures compacités granulaires. Également pour la taille moyenne des particules, plus les poudres sont grossières ou fines, plus la compacité granulaire est élevée. Ceci est attribué à la grande différence dans la granulométrie de ces poudres par rapport à celle du ciment. Plus la granulométrie des poudres est différente à celle du ciment, plus le réarrangement entre les particules devient intéressant, résultant à une diminution importante dans la quantité d'eau retenue dans les pâtes et donc une augmentation de la compacité. Sakai et coll. (1997) ont constaté les mêmes résultats sur des poudres de fillers calcaires, où les fillers classés grossiers ou fins ont donné les compacités granulaires les plus importantes en comparaison avec les autres fillers étudiés. Dans le cadre de la même étude, les résultats ont montré que les fillers qui ont donné les meilleures compacités ont aussi donné les meilleures fluidités. Dans le cadre de cette étude, il est très difficile de voir la lumière des résultats de la compacité sur les propriétés rhéologiques des différents MBE étudiés. Ceci se dit vu que tous les AM ont eu un effet bénéfique sur la compacité mais qu'au niveau de la fluidité, d'autres mécanismes peuvent avoir lieu, comme l'effet de la surface spécifique et l'interaction avec les adjuvants, conduisant à des résultats variables d'une poudre à une autre.

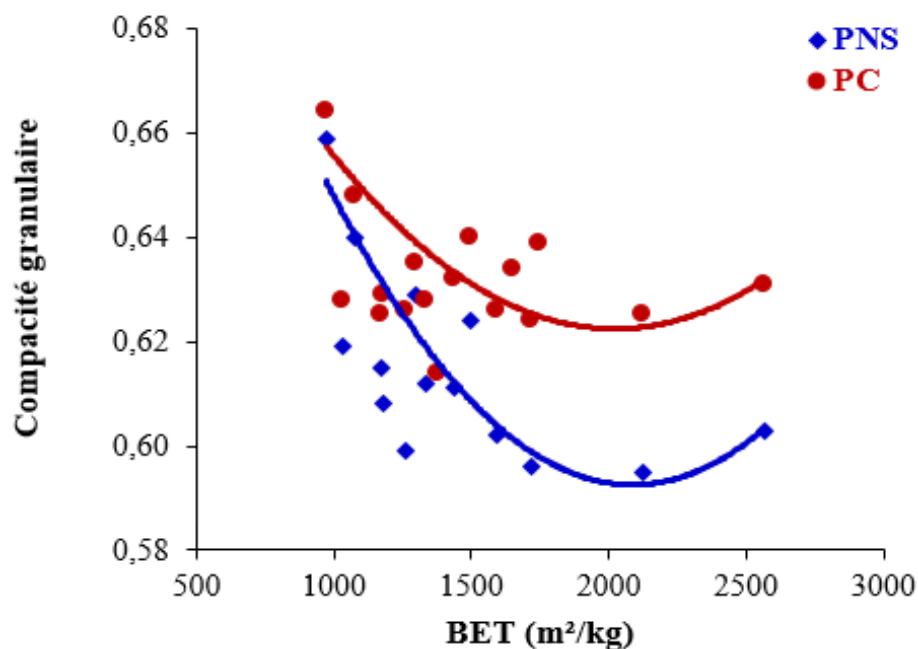


Figure 6.29 Compacité granulaire des pâtes en fonction de la surface spécifique des poudres en présence de PNS et PC

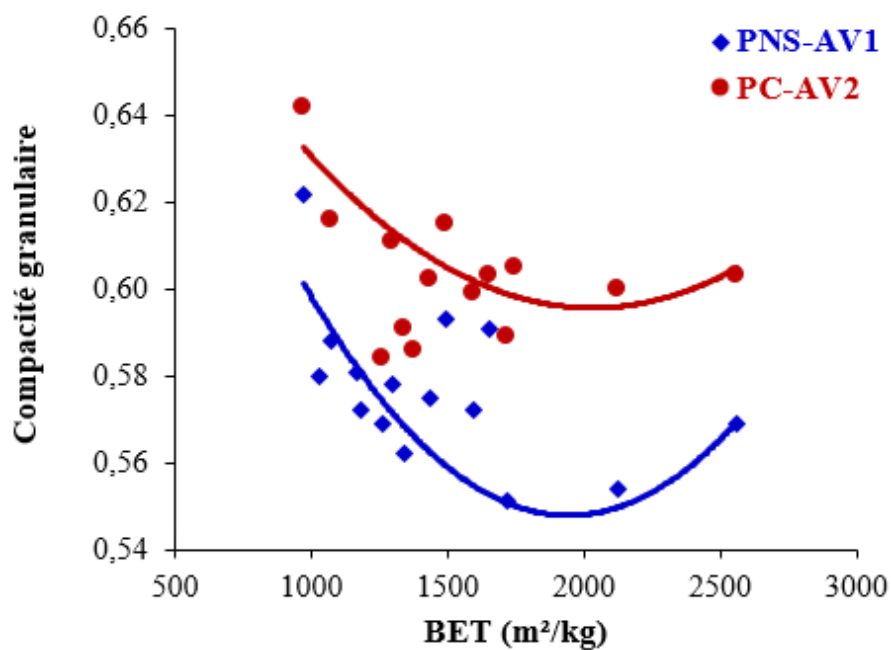


Figure 6.30 Compacité granulaire des pâtes en fonction de la surface spécifique des poudres en présence de PNS-AV1 et PC-AV2

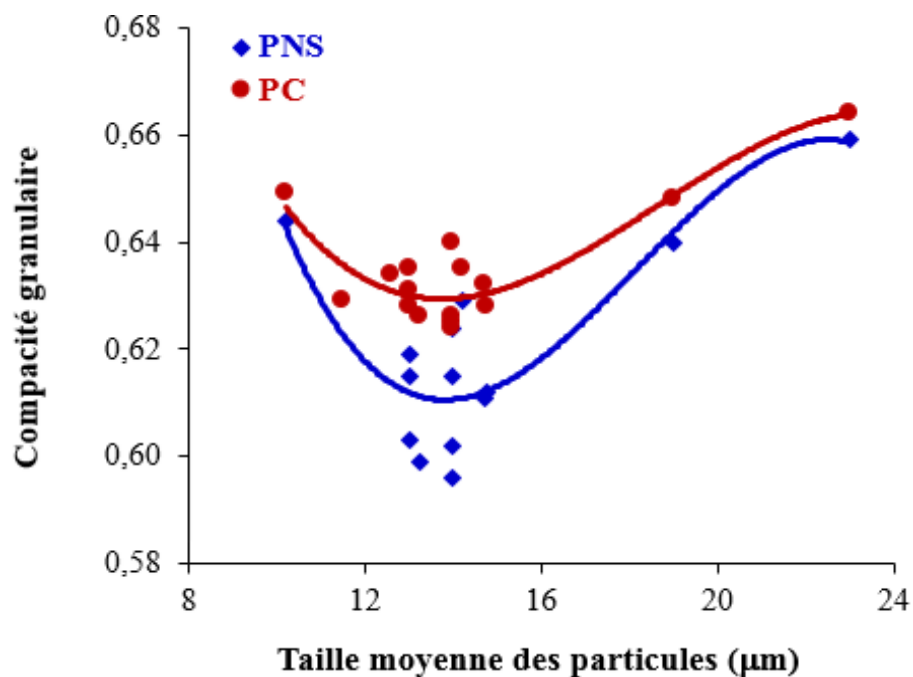


Figure 6.31 Compacité granulaire des pâtes en fonction de la taille moyenne des poudres en présence de PNS et PC

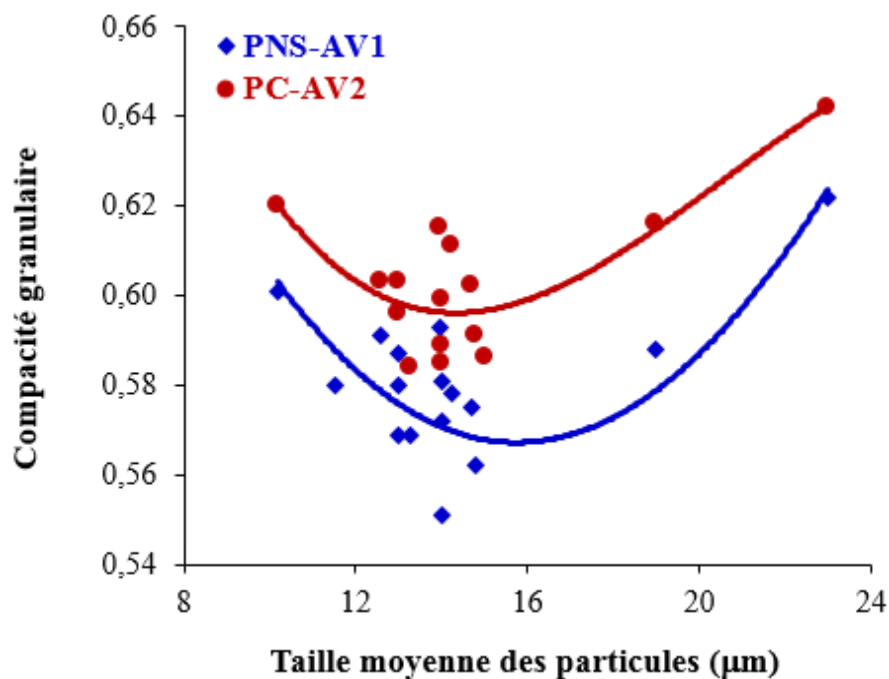


Figure 6.32 Compacité granulaire des pâtes en fonction de la taille moyenne des poudres en présence de PNS-AV1 et PC-AV2

6.6 EFFET DES AM ET DES FILLERS SUR L'INTERACTION CIMENT-SP AVEC ET SANS LA PRÉSENCE D'AV

La présence des AM dans les systèmes cimentaires peut affecter l'interaction entre les adjuvants (SP et AV) et le ciment. Par conséquent, leur compatibilité et leur affinité vis-à-vis un adjuvant doivent être déterminées. Pour cela, la meilleure façon est d'effectuer des tests d'adsorption des adjuvants (SP et AV) dans les systèmes cimentaires (coulis ou mortiers). Dans le cadre de cette étude, ces tests ont été entrepris sur les systèmes binaires en présence de PNS seul. Néanmoins, le reste des essais en présence de PC seul, PNS-AV1 et PC-AV2 n'ont pas pu être effectués à cause de certains problèmes de planification et d'ordre de priorité dans le laboratoire. Par ailleurs, d'autres tests qui consistent à déterminer le point de saturation en SP sur des coulis de ciment ont permis de donner une indication sur la quantité de SP à utiliser avant la saturation, un indice sur l'adsorption du SP sur les particules des poudres ainsi que l'évolution des propriétés rhéologiques en fonction du temps. De plus, la charge de surface des AM et des fillers a été mesurée par le potentiel zêta des suspensions contenant différents AM sans adjuvants.

La demande en SP pour atteindre la saturation a été déterminée sur des coulis de ciment contenant des dosages variables en AM, sans puis avec la présence d'AV pour les deux types de SP étudiés (PNS et PC). Généralement, le point de saturation est déterminé par l'essai au cône de Marsh. Dans cette étude, ce sont les mesures des propriétés rhéologiques (seuil de cisaillement et viscosité plastique) qui ont été utilisées pour déterminer les points de saturation en SP en présence de multiples AM. Le dosage en SP est augmenté graduellement jusqu'à ce que la fluidité du coulis ne soit plus améliorée, ce qui signifie que la capacité maximale de défloculation du SP est atteinte. En effet, une quantité supplémentaire de SP restera en surplus dans la solution et n'entraînera aucune amélioration des propriétés rhéologiques car tous les grains de ciment sont déjà enveloppés d'une couche de polymères.

Pour chaque AM/filler, des coulis sont préparés avec un rapport E/P de 0,40 et avec différents dosages en SP jusqu'à saturation. Le seuil de cisaillement ainsi que la viscosité plastique sont mesurés à 5 et 60 min du contact eau-ciment, moyennant le viscosimètre ConTec 6. Pour chaque poudre, deux taux de remplacement sont choisis, le taux de remplacement minimal et le taux de remplacement maximal adoptés lors de l'étude à l'échelle des MBE. De plus, pour chaque taux

de remplacement, deux types de SP (PNS et PC) et deux combinaisons SP-AV (PNS-AV1 et PC-AV2) sont évalués. Les dosages des deux AV utilisés sont maintenus les mêmes que ceux utilisés pour les MBE-AP, c'est-à-dire 0,25% pour AV1 et 0,086% pour AV2 (les pourcentages sont exprimés en extrait sec/masse poudre). L'obtention d'un point de saturation a requis la préparation de 4 et 7 coulis.

Comme les points de saturation ont été déterminés principalement avec les courbes de la viscosité plastique et du seuil de cisaillement, la discussion ci-après se portera principalement sur l'effet des AM sur la demande en SP, l'efficacité des SP et le point de saturation. Ce qui signifie qu'il y a beaucoup moins de commentaires vis-à-vis la viscosité plastique des coulis en questions.

6.6.1 Points de saturation des coulis de ciment témoins

Les figures 6.34 à 6.36 représentent les résultats de la viscosité plastique et du seuil de cisaillement des coulis de ciment témoins (100% ciment GU) en présence de PNS, PC, PNS-AV1 et PC-AV2. Les résultats montrent que les points de saturation obtenus pour les différents SP semblent être relativement bien définis surtout à travers la représentation de la viscosité plastique. En effet, l'augmentation du dosage en SP diminue la viscosité plastique des coulis puis à un certain dosage, une cassure apparaît sur la courbe au point de saturation puis la viscosité du coulis se stabilise par la suite (figure 6.34). Les coulis en présence de PC ont présenté des viscosités plastiques légèrement plus élevées que ceux avec PNS. Mais à la saturation, les deux coulis ont présenté une viscosité plastique de 0,1 Pa.s.

Pour les mélanges de référence les résultats sur le seuil de cisaillement à 5 et 60 min semblent bien raisonnables et aucun signe de grande incompatibilité (inefficacité du SP, perte brusque de fluidité, présence de bulle d'air) n'est signalé pour les deux SP, que ce soit avec ou sans l'utilisation d'un AV. En présence de PC, la courbe du seuil de cisaillement semble un peu plus raide en comparaison avec celle de PNS. Ceci est dû à l'importante quantité de PNS qu'il faut ajouter pour diminuer le seuil de cisaillement comparativement avec le PC. En effet, pour un même seuil de cisaillement, la quantité nécessaire en PNS est au minimum deux fois plus importante que celle en PC. Les points de saturation en présence de PNS et PC, respectivement, sont à 0,55% et 0,18% (en extrait sec/masse ciment).

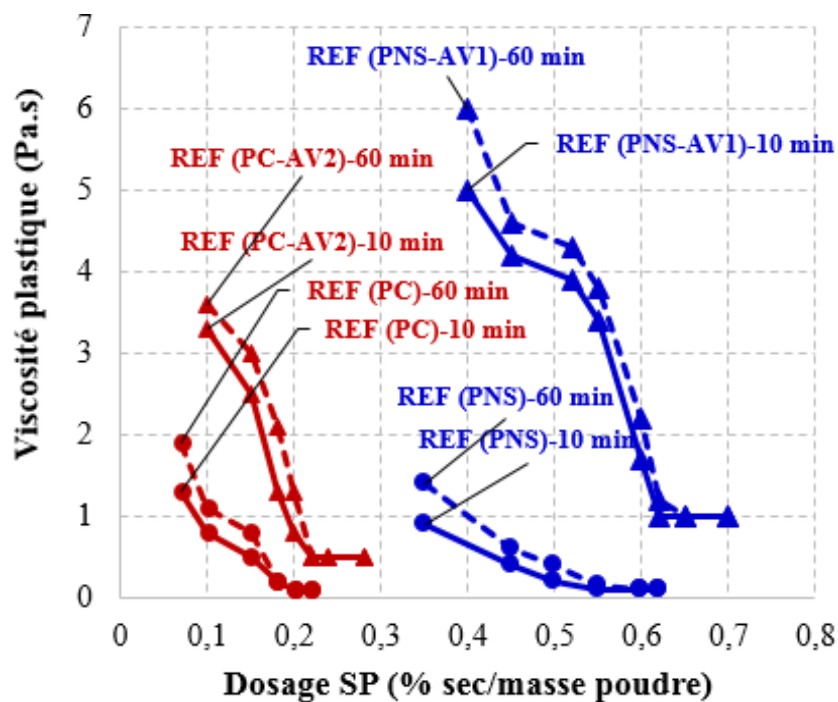


Figure 6.33 Évolution de la viscosité plastique à 5 et 60 min du ciment GU en présence de PNS, PC, PNS-AV1 et PC-AV2

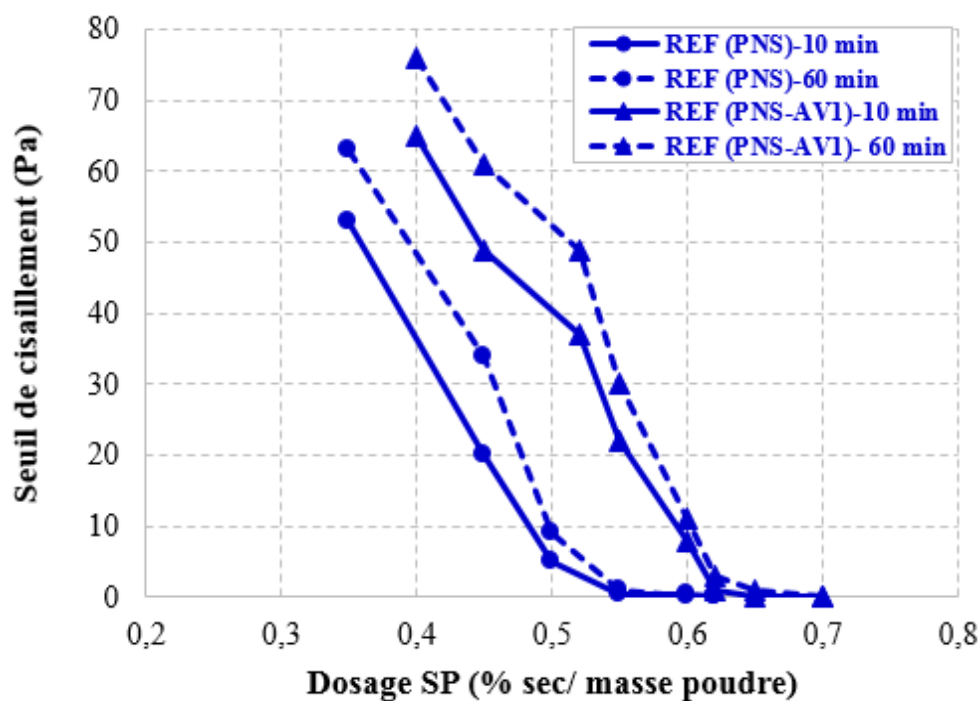


Figure 6.34 Évolution du seuil de cisaillement à 5 et 60 min du ciment GU en présence de PNS et PNS-AV1

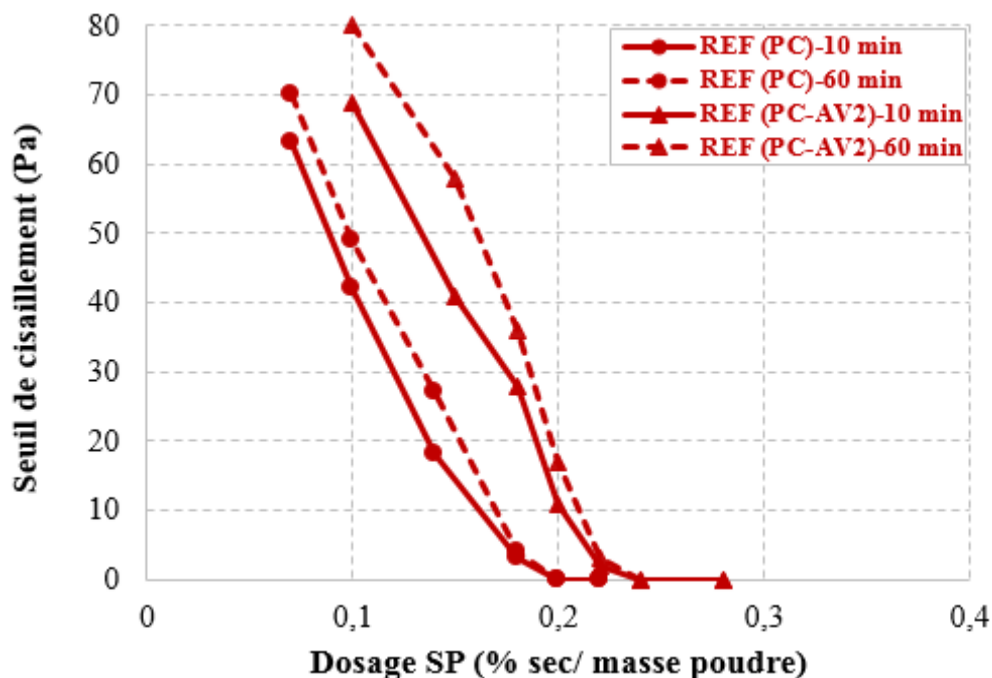


Figure 6.35 Évolution du seuil de cisaillement à 5 et 60 min du ciment GU en présence de PC et PC-AV2

La présence d'un AV a eu pour effet d'augmenter les dosages nécessaires en SP pour diminuer le seuil de cisaillement. Les courbes du seuil de cisaillement sont légèrement plus étalées et les points de saturation sont retardés. Ces derniers sont à 0,62% et 0,22% en présence de PNS-AV1 et PC-AV2. Quant à la viscosité plastique, elle est de 1,5 fois plus importante avec la combinaison PNS-AV1 en comparaison avec PC-AV2. De plus, à la saturation, les coulis en présence de PNS-AV1 ont présenté une viscosité de 1 Pa.s alors qu'elle est de 0,5 Pa.s avec PC-AV2.

6.6.2 Point de saturation des ciments binaires en présence de SP seul

Les figures 6.37 et 6.41 représentent l'évolution du seuil de cisaillement avec le dosage en SP à 5 et 60 min des coulis contenant des faibles taux de remplacement en AM en présence de PNS et PC, respectivement. Les résultats montrent que les coulis contenant 2% FS ont présenté un seuil de cisaillement légèrement supérieur à celui des coulis références avec l'augmentation du dosage en SP. Une légère augmentation est notée dans le point de saturation en PC qui est devenu 0,24% comparativement à 0,22% pour le référence, alors qu'il est resté le même pour le PNS.

Tableau 6.7 Récapitulatif des points de saturation en SP des coulis contenant différents AM sans et avec l'agent de viscosité

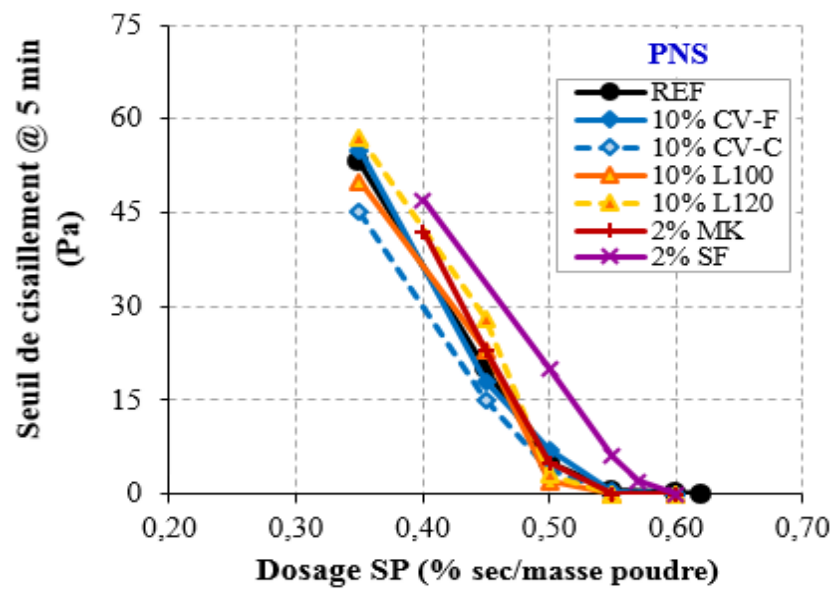
Coulis	PNS	PC	PNS-AV1	PC-AV2
REF	0,55	0,18	0,62	0,22
10% CV-F	0,55	0,18	0,62	0,22
40% CV-F	0,55	0,18	0,62	0,20
10% CV-C	0,55	0,18	0,60	0,22
40% CV-C	0,45	0,12	0,48	0,14
10% CC35	-	-	0,62	0,22
40% CC35	-	-	0,60	0,18
10% CC3	-	-	0,62	0,22
40% CC3	-	-	0,60	0,20
10% L100	0,55	0,18	0,62	0,22
50% L100	0,50	0,12	0,52	0,18
10% L120	0,55	0,18	0,62	0,22
50% L120	0,55	0,12	0,57	0,18
2% MK	0,55	0,20	0,62	0,23
7% MK	0,62	0,22	0,70	0,28
2% FS	0,57	0,18	0,62	0,24
7% FS	0,67	0,25	0,75	0,32

Par ailleurs, le PC a montré une bonne efficacité en présence de 10% L100 où le seuil de cisaillement se trouve diminué d'au moins 24% par rapport au coulis de référence. Cependant, le point de saturation est resté pareil que celui à 100% ciment. Les autres coulis ont présenté des fluidités plus ou moins proches de celle des mélanges de référence et le point de saturation a demeuré le même. Ceci peut signifier que pour des faibles taux de remplacement, les différents AM n'ont pas un effet significatif sur la quantité de SP adsorbée.

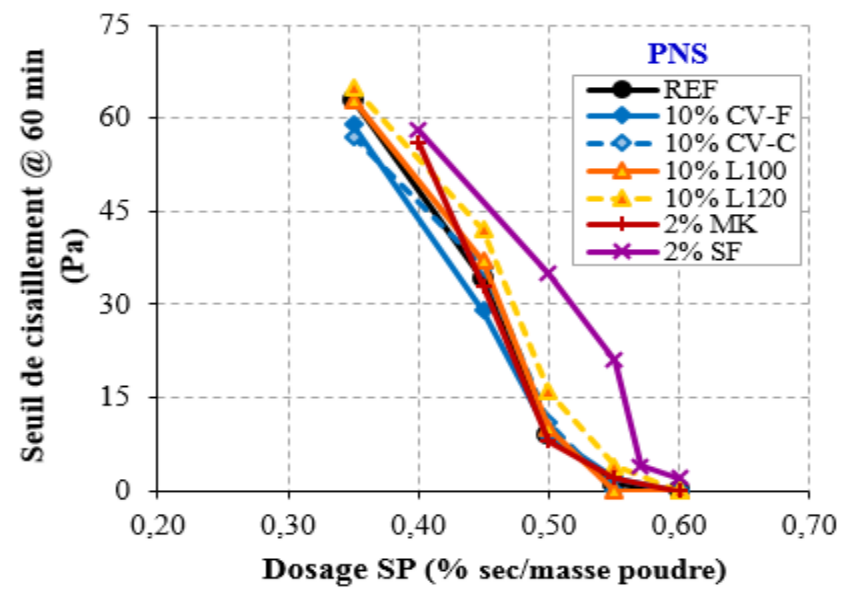
L'augmentation du taux de remplacement des AM du minimum au maximum (taux adoptés dans la phase des MBE binaires) semble avoir un effet considérable sur la fluidité des coulis et le point de saturation pour les deux SP (figures 6.39, 6.40, 6.43 et 6.44). Les coulis à 40% CV-C, 40% CV-F, 50% L100 et 50% L120 ont tous présenté des demandes en SP et des points de saturation plus faibles que les coulis de référence. Toutefois, une nette différence est notée entre les coulis contenant 40% CV-C avec les coulis à 40% CV-F. Pour un seuil de cisaillement de 30 Pa, la présence de 40% CV-C a diminué la demande en PNS de 45% et la demande en PC de 60% comparativement avec les coulis de référence. Alors qu'avec 40% CV-F, la demande en SP a diminué de 36% et 44% pour PNS et PC, respectivement, par rapport aux coulis de référence. Le

point de saturation en SP pour les coulis à 40% CV-C est de 0,45% et 0,12% en PNS et PC, respectivement. Tandis que pour 40% CV-F, il est resté le même que pour les coulis références (0,55% et 0,18%). Ceci peut signifier que l'adsorption des deux SP est plus importante sur les particules de la CV-F que sur les particules de la CV-C, pourtant la CV-C est plus riche en calcium comparativement avec la CV-F qui est supposé fournir plus de site d'adsorption. Par ailleurs, les images des deux cendres volantes avec le MEB déjà présentés au chapitre 4 (figures 4.4-a et 4.4-b) montrent que la surface de la CV-F n'est pas vraiment lisse et que la présence des particules se caractérisant par des irrégularités est notée. Néanmoins, dans le cas de la CV-C, les particules sont parfaitement lisses avec très peu de particules irrégulières. Ceci peut rendre l'adsorption du SP sur les particules de la CV-C plus faible par rapport à la CV-F. Cette constatation a été aussi utilisée par Chen et coll. (2012) pour expliquer la faible adsorption des SP vis-à-vis la CV-F en comparaison avec le ciment.

Les résultats pour les deux laitiers montrent que, d'une part, le PNS semble être plus efficace en présence de 50% L100 en comparaison avec 50% L120. En effet, la demande en PNS pour le coulis à 50% L120 est identique à celle du coulis de référence et le point de saturation réside aussi le même. Alors qu'avec 50% L100, la demande en PNS peut être diminuée de 12% et le point de saturation est de 0,50% au lieu de 0,55% pour le coulis de référence. D'autre part, avec le PC, les deux coulis ont présenté des fluidités très proches avec une meilleure performance par rapport au coulis de référence. La demande en PC pour les deux laitiers a diminué jusqu'à 50% par rapport à la demande de 100% de ciment et le point de saturation a diminué de 33%. Le laitier possède un faible nombre de sites actifs sur lesquels le SP peut s'adsorber en comparaison avec le ciment [Saric-Coric, 2001]. Mais étant donné que le L120 est plus fin que le L100, il semble y avoir plus de sites actifs pour le L120, ce qui a résulté à une demande en PNS plus importante que pour le L100. Par ailleurs, le PC a un mode de dispersion par les deux effets (électrostatique et stérique) mais le mode de dispersion principale est la répulsion stérique. Il s'avère que la différence dans la finesse des deux laitiers n'a pas un effet notable sur la demande en PC.

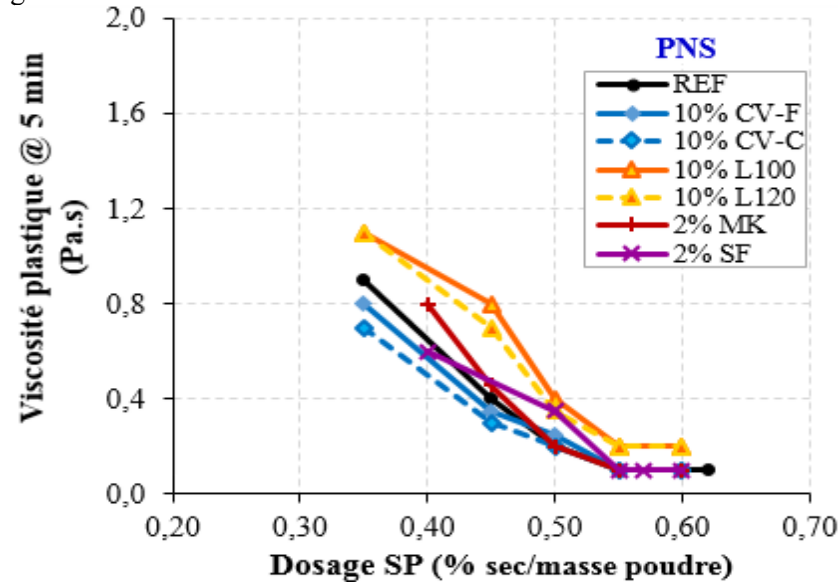


(a)

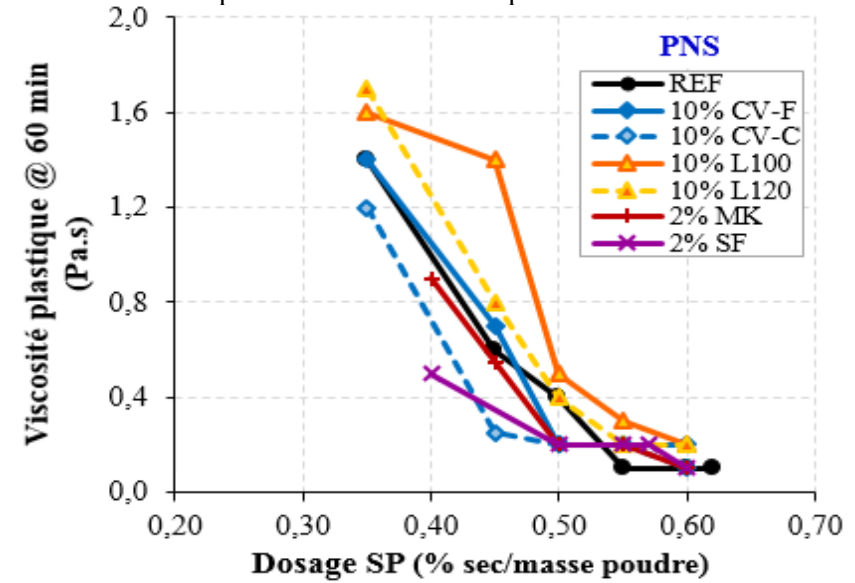


(b)

Figure 6.36 Seuil de cisaillement à 5 et 60 min des coulis contenant les AM avec des taux de remplacement minimaux en présence de PNS

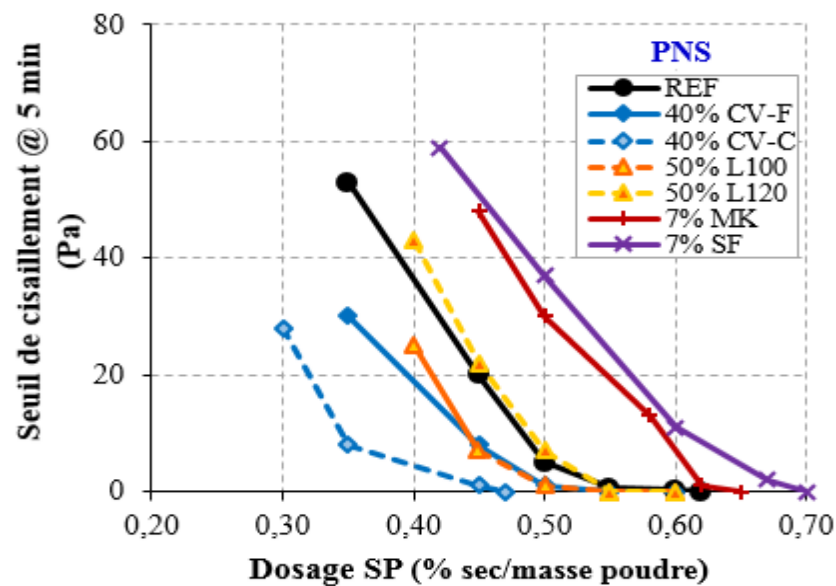


(a)

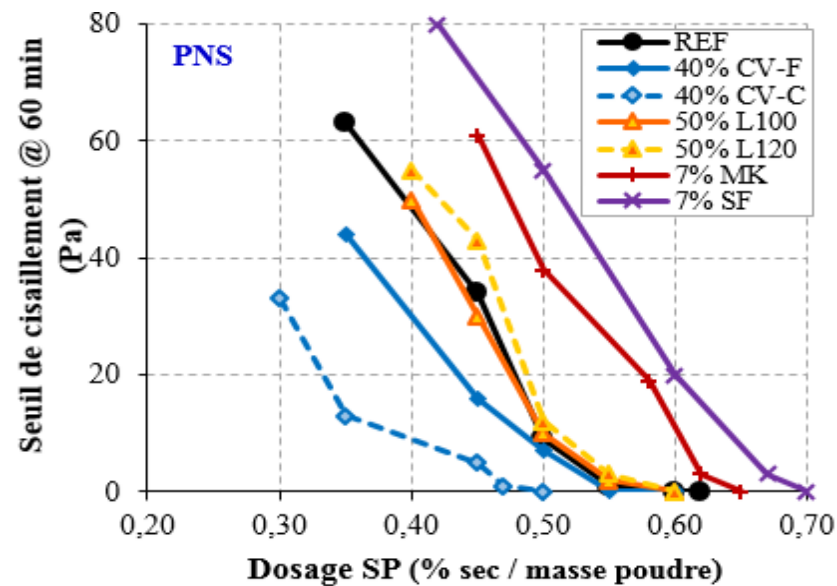


(b)

Figure 6.37 Viscosité plastique à 5 et 60 min des coulis contenant les AM avec des taux de remplacement minimaux en présence de PNS

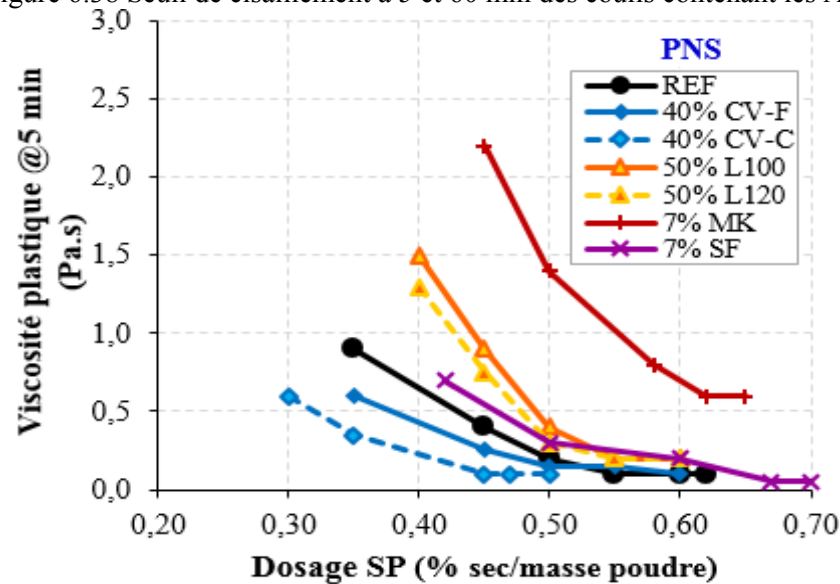


(a)

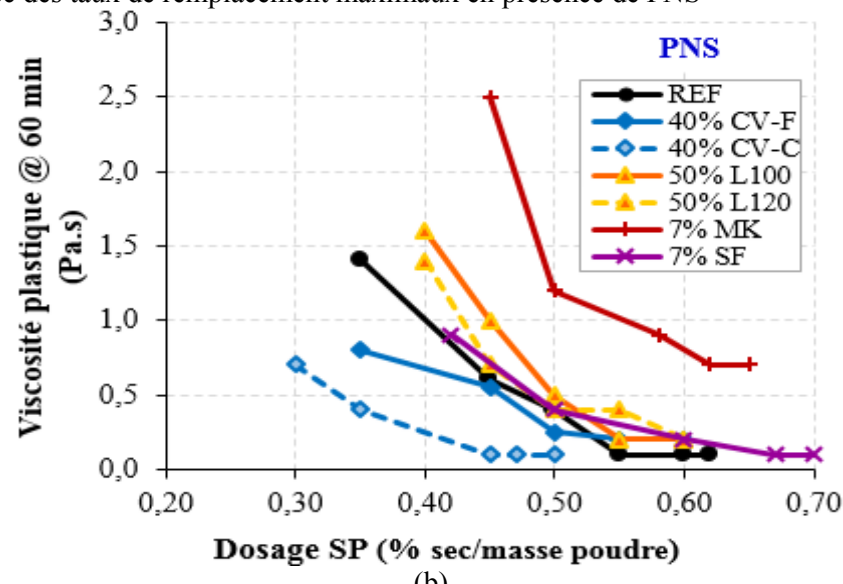


(b)

Figure 6.38 Seuil de cisaillement à 5 et 60 min des coulis contenant les AM avec des taux de remplacement maximaux en présence de PNS

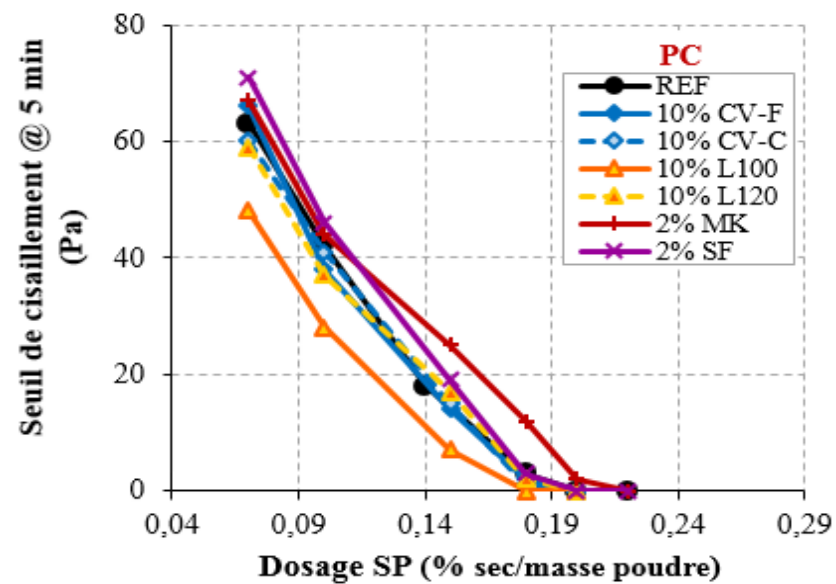


(a)

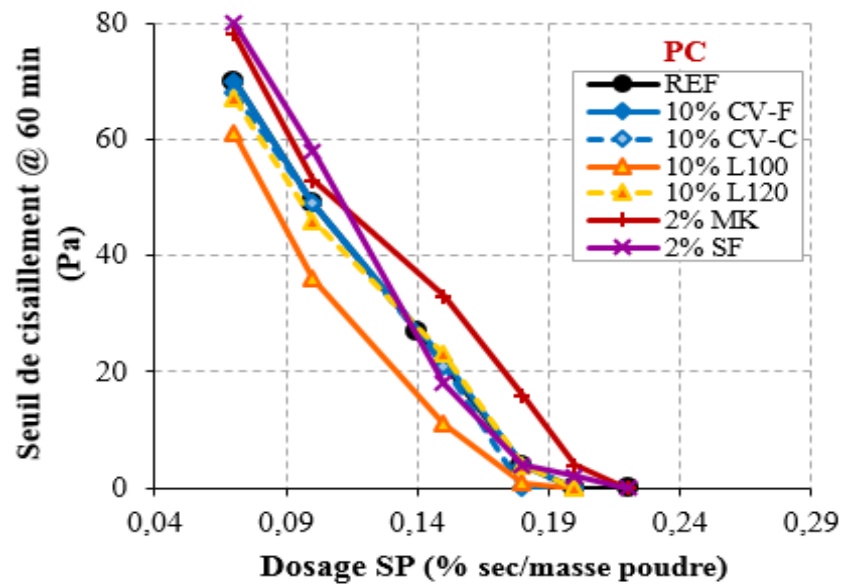


(b)

Figure 6.39 Viscosité plastique à 5 et 60 min des coulis contenant les AM avec des taux de remplacement maximaux en présence de PNS

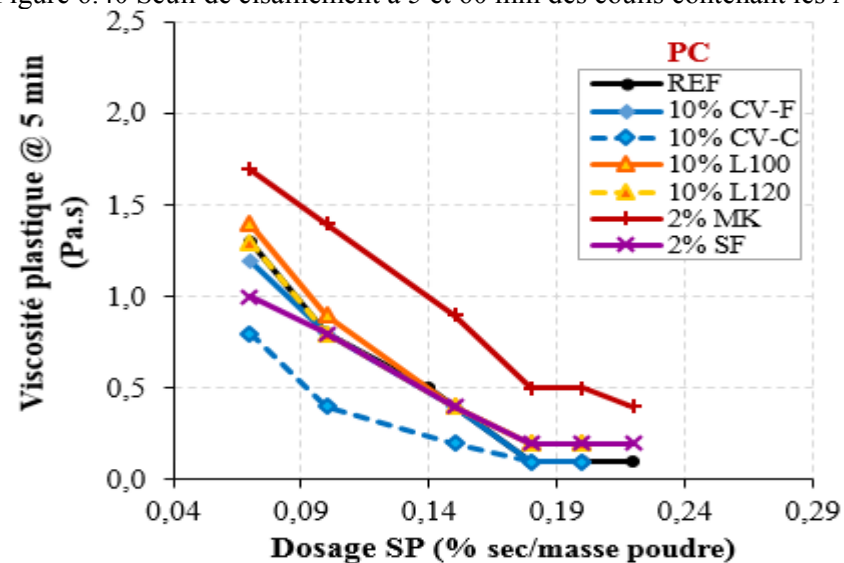


(a)

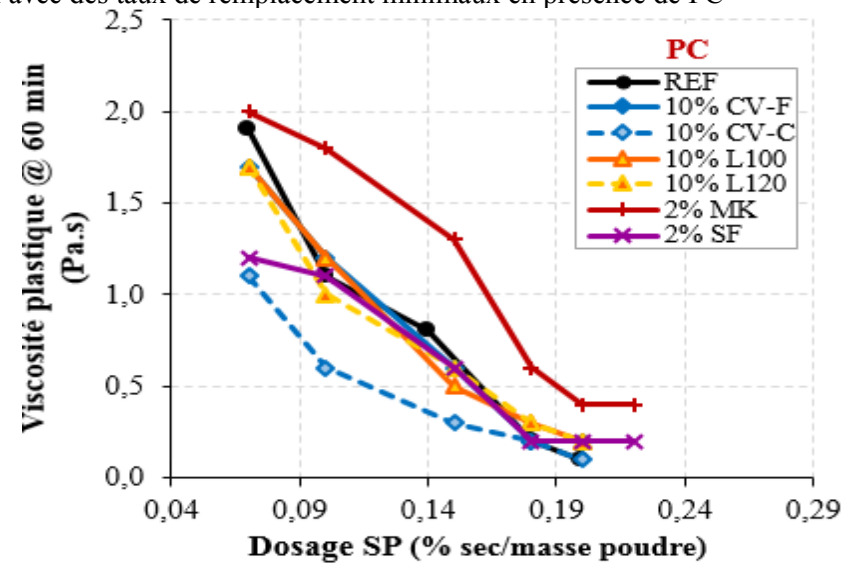


(b)

Figure 6.40 Seuil de cisaillement à 5 et 60 min des coulis contenant les AM avec des taux de remplacement minimaux en présence de PC

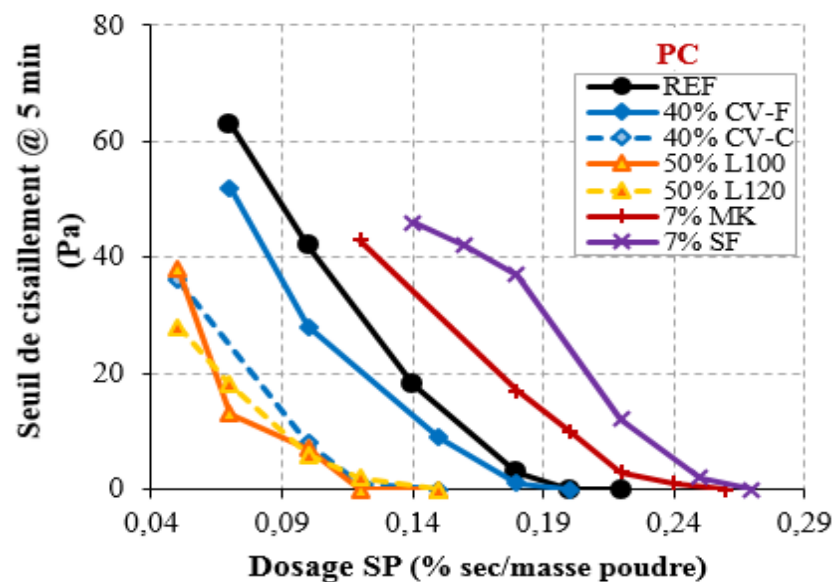


(a)

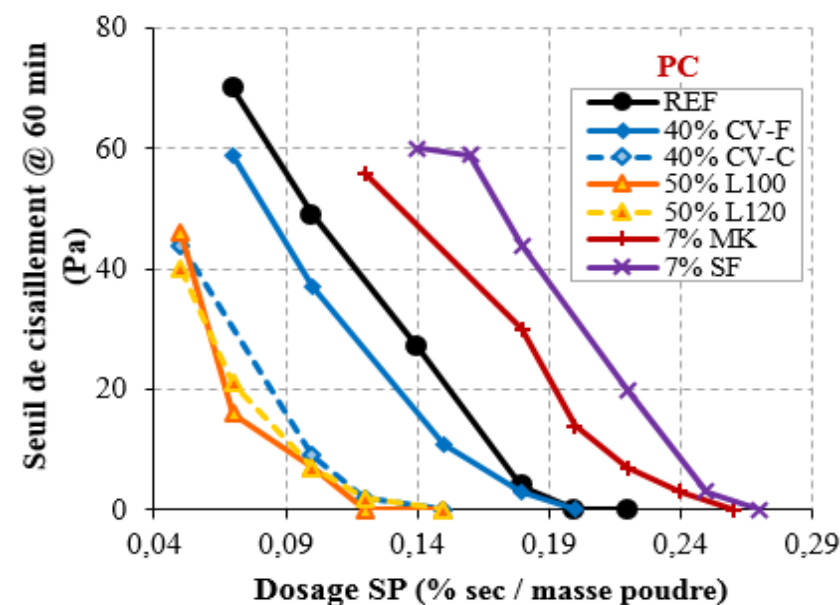


(b)

Figure 6.41 Viscosité plastique à 5 et 60 min des coulis contenant les AM avec des taux de remplacement minimaux en présence de PC

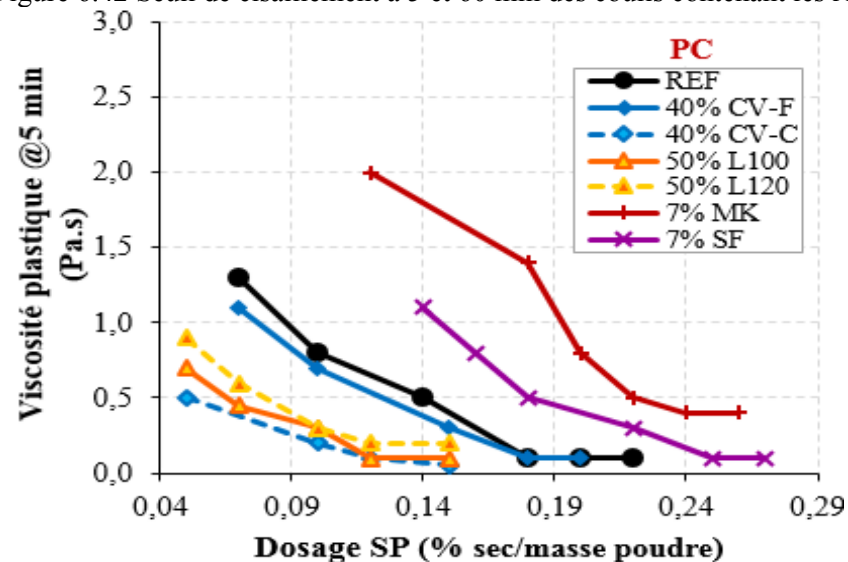


(a)

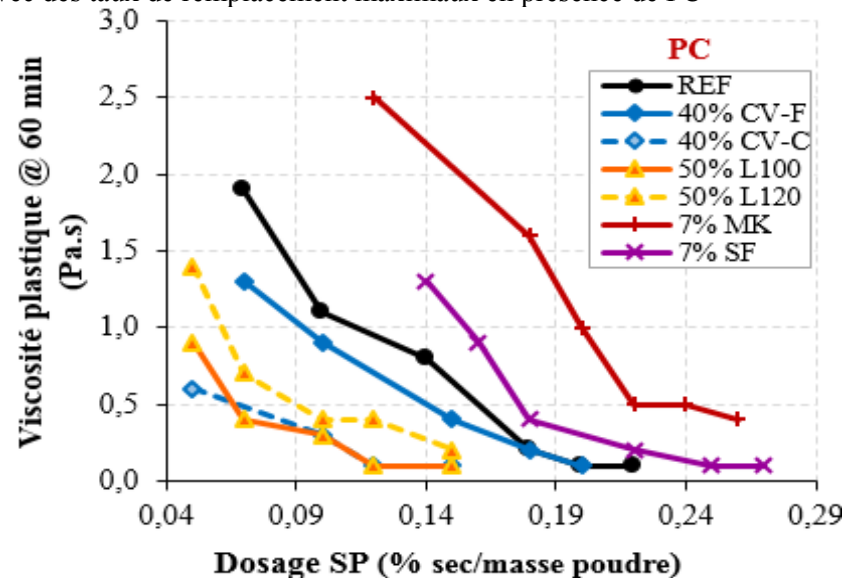


(b)

Figure 6.42 Seuil de cisaillement à 5 et 60 min des coulis contenant les AM avec des taux de remplacement maximaux en présence de PC



(a)



(b)

Figure 6.43 Viscosité plastique à 5 et 60 min des coulis contenant les AM avec des taux de remplacement maximaux en présence de PC

La présence de 7% de FS ou de 7% de MK a augmenté significativement la demande des deux SP. En effet, la demande en PNS a augmenté de 25% pour les deux AM avec une augmentation du point de saturation de 13% avec 7% MK et 22% avec 7% FS, par rapport au coulis de référence. Le MK et la FS présentent une faible affinité avec le PNS vu que les deux AM présentent des surfaces fortement chargées négativement (tableau C.1), ce qui est supposé diminuer leur capacité d'adsorption par rapport au ciment. Mais le fait que la FS et le MK présentent des surfaces spécifiques très importantes, cela compense le manque d'affinité et augmente ainsi la demande en SP [Burgos-Montes et coll., 2012]. La demande en PC est affectée encore plus significativement, elle a augmenté de 21% avec 7% de MK et de 50% avec 7% de FS par rapport au coulis de référence. Quant au point de saturation, il correspond à 0,22% avec 7% MK et 0,25% avec 7% FS comparativement à 0,18% avec 100% ciment (tableau 6.7). Plank et coll.(2009) ont étudié l'efficacité des SP à base de PC dans le béton à ultra-haute résistance contenant 16% de FS. Les auteurs ont trouvé que la charge négative de surface de la FS peut se convertir en positive dans un milieu où il y a suffisamment d'ion Ca^{2+} dû à l'adsorption de ce dernier. Par conséquent, la FS peut rivaliser avec le ciment pour adsorber le PC, ce qui augmente la demande du PC.

6.6.3 Point de saturation des ciments binaires en présence de SP-AV

Les résultats des points de saturation du ciment binaire en présence de SP-AV sont illustrés sur les figures 6.45 à 6.52. L'évolution du seuil de cisaillement et de la viscosité plastique avec la demande en SP à 5 et 60 min des coulis contenant des faibles taux de remplacement en AM en présence de PNS-AV1 et PC-AV2 sont présentées sur les figures 6.45, 6.46, 6.49 et 6.50, respectivement. En présence de PNS-AV1, les différents coulis ont présenté la même allure des courbes du seuil de cisaillement à 5 et 60 min. Certains coulis, tels que ceux avec 10% CV-C, 10% L120, 10% CC35 et 2% FS, ont noté une légère réduction du seuil de cisaillement de l'ordre de 13% en comparaison avec le coulis de référence. Cependant, tous les coulis avec des taux de remplacement minimaux en AM ont présenté le même point de saturation en PNS (0,62%) que celui du coulis de référence (100% ciment). Ceci signifie qu'en présence d'un AV et pour les faibles taux de remplacement, les AM n'ont pas eu un effet notable sur la quantité de SP adsorbé. De plus, la présence d'un AV a eu comme effet

d'augmenter juste le point de saturation comparativement avec les coulis en présence de SP seul. Les mêmes constatations sont notées en présence de PC-AV2, sauf pour les coulis contenant 2% FS et 2% MK où le seuil de cisaillement est plus élevé en présence de PC-AV2. À 0,15% de PC, ces coulis ont noté une augmentation du seuil de cisaillement de 46% et 34%, respectivement. Au-delà de 0,20% de PC, le seuil de cisaillement de ces coulis a chuté pour rejoindre celui du mélange de référence. Les points de saturation de ces coulis, qui sont déterminés simultanément à travers les résultats de la viscosité plastique et du seuil de cisaillement, sont restés très proches du coulis de référence (0,24% et 0,23%, respectivement).

La perte de fluidité entre 5 et 60 min semble aussi suivre l'allure du coulis de référence, aucune perte drastique n'est notée pour les différents AM. Cette perte est principalement causée par la consommation de SP par le ciment. Il paraît qu'en présence d'AV et pour des faibles taux de remplacement en AM, la consommation de SP est quasiment pareille que celle en présence de 100% de ciment.

Les résultats obtenus pour des taux de remplacement maximaux en AM (figure 6.47, 6.48, 6.51 et 6.52) montrent que les courbes du seuil de cisaillement en présence de PC-AV2 sont un peu plus raides qu'en présence de PNS-AV1. Une petite augmentation du dosage de PC entraîne une importante diminution dans le seuil de cisaillement, ce qui signifie que les AM étudiés sont plus efficaces et présentent une faible affinité en présence de PC-AV2 qu'en présence de PNS-AV1.

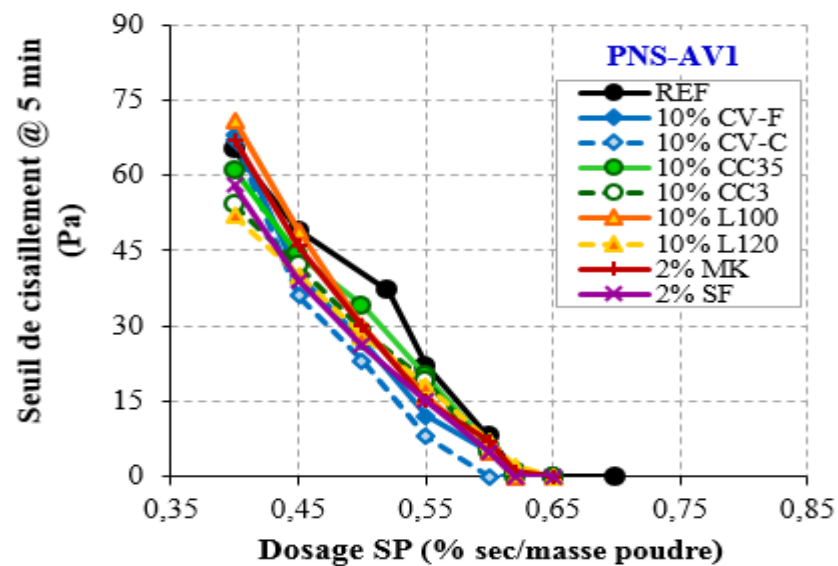
Les coulis contenant 40% CV-C ont présenté, encore une fois, les plus faibles demande en SP avec une meilleure fluidité par rapport aux autres poudres, notamment par rapport à 40% CV-F, et ceci pour les deux cas de combinaison SP-AV. Le point de saturation des coulis à 40% CV-C a diminué de 36% et 23 % en présence de PC-AV2 et PNS-AV1, respectivement, en comparaison avec les coulis de référence respectifs; par contre, pour 40% de CV-F, le point de saturation a diminué de 9% en présence de PC-AV2 et demeure le même en présence de PNS-AV1. Ceci signifie qu'encore une fois et en présence d'un AV, la CV-F a présenté une meilleure affinité avec PNS et le PC comparativement avec la CV-C.

Par ailleurs, une grande différence est notée dans l'efficacité de PNS dans les coulis contenant les fillers en comparaison avec le PC, les deux en présence de leurs AV compatibles. En effet,

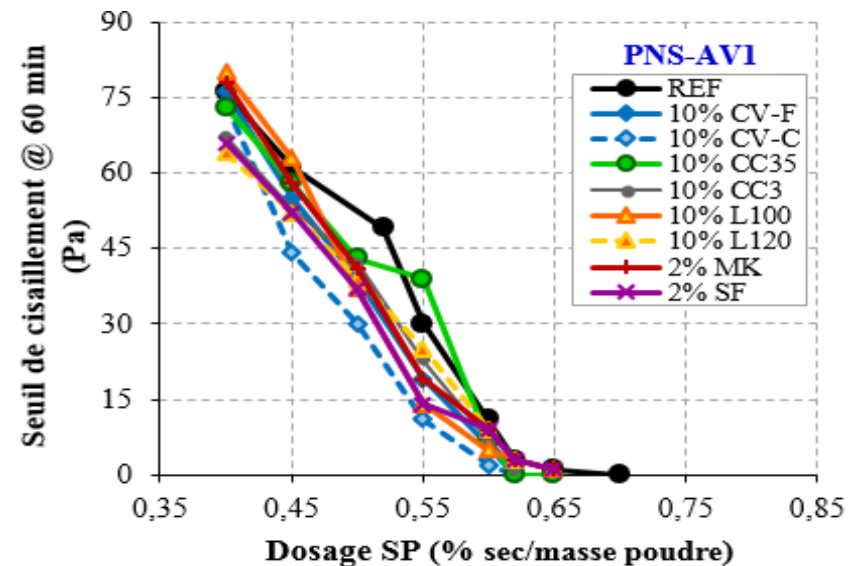
pour un seuil de cisaillement de 30 Pa, les coulis à 40% CC35 et 40% CC3 ont noté une diminution dans la demande en SP de 33% en présence de PC-AV2 alors que la diminution est de 2% et 9%, respectivement, en présence de PNS-AV1 et par rapport aux coulis références respectifs. Pour ces deux mêmes coulis, le point de saturation a diminué de 18% en présence de PC-AV2, alors qu'il a diminué de 3% et 10%, respectivement, en présence de PNS-AV1. Ceci confirme les résultats trouvés à l'échelle des MBE et appuie les résultats de Burgos-Montes et coll. (2012) qui ont constaté que le SP à base de PC s'adsorbe plus intensément sur les particules des fillers en comparaison avec les autres SP.

Les constatations notées pour les deux laitiers en présence d'un AV ne sont pas très différentes de celles en présence de SP seul. D'une part, il paraît que le PNS est plus efficace en présence de 50% L100 qu'avec 50% L120. La même remarque est perçue avec le PC, sauf que la différence est légère entre les deux laitiers. En effet, en présence de PNS-AV1, la demande en PNS est plus importante pour les coulis contenant 50% L120 dont le point de saturation est à 0,57% alors qu'il est de 0,52% pour les coulis contenant 50% L100. Ceci est toujours attribué au fait que le L120 est plus fin que le L100, ce qui favorise la présence de plus de sites actifs pour l'adsorption du PNS. D'autre part, en présence de PC-AV2 et avec les deux laitiers, les coulis sont plus fluides qu'en présence de PNS-AV1, mais une légère différence est notée dans la demande en PC des deux laitiers (L100 et L120) sans avoir un effet notable sur le point de saturation qui est de 0,18% pour les deux laitiers.

La substitution de 7% de ciment par la FS a résulté en une importante augmentation de la demande en SP et cette augmentation est plus importante dans le cas du PC en présence de son AV compatible. Pour un seuil de cisaillement de 30 Pa, la demande en PNS a augmenté de 16% et la demande en PC a augmenté de 33% par rapport aux coulis références et en présence d'AV respectifs. Les dosages en saturation ont aussi augmenté de 21% et 45% pour le PNS et PC, respectivement. La demande en SP et les points de saturation ont aussi augmenté dans les coulis à 7% MK, mais l'augmentation est moins importante par rapport à 7% FS vu que le MK présente une surface spécifique plus faible que la FS.

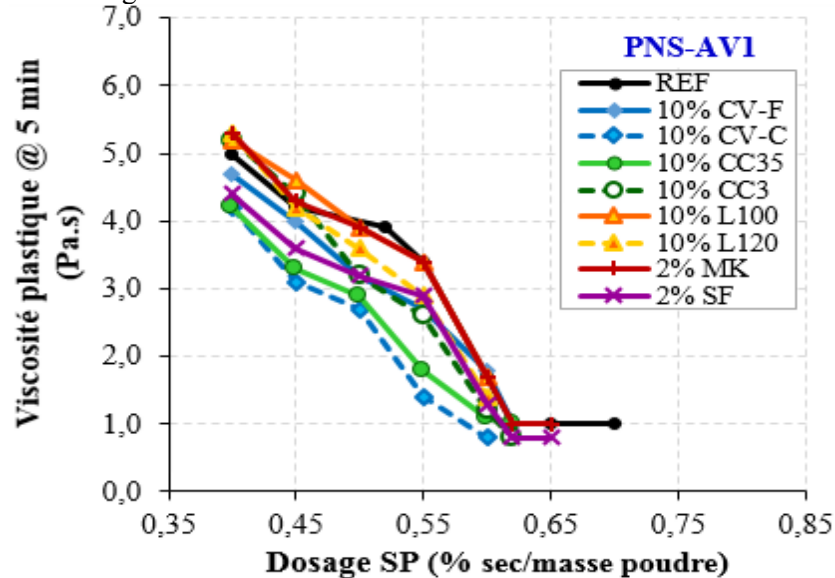


(a)

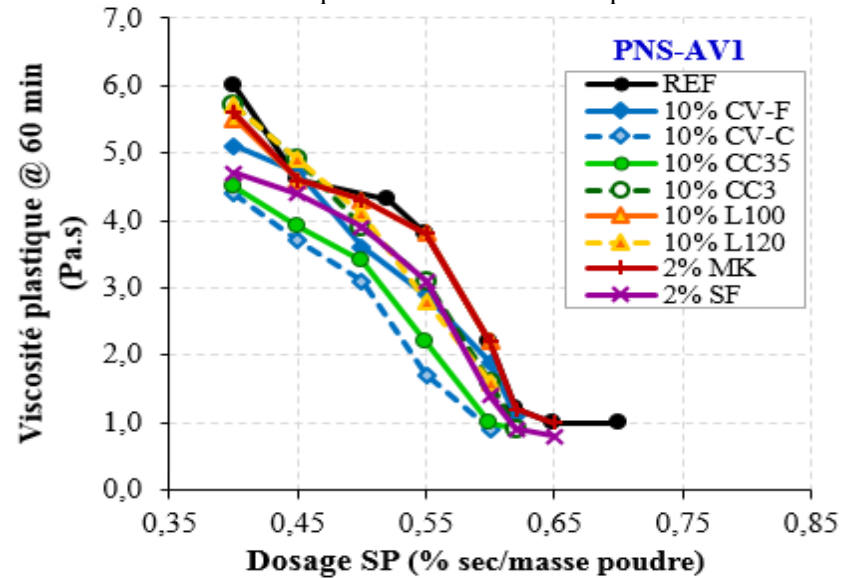


(b)

Figure 6.44 Seuil de cisaillement à 5 et 60 min des coulis contenant les poudres avec des taux de remplacement minimaux en présence de PNS-AV1



(a)



(b)

Figure 6.45 Viscosité plastique à 5 et 60 min des coulis contenant les poudres avec des taux de remplacement minimaux en présence de PNS-AV1

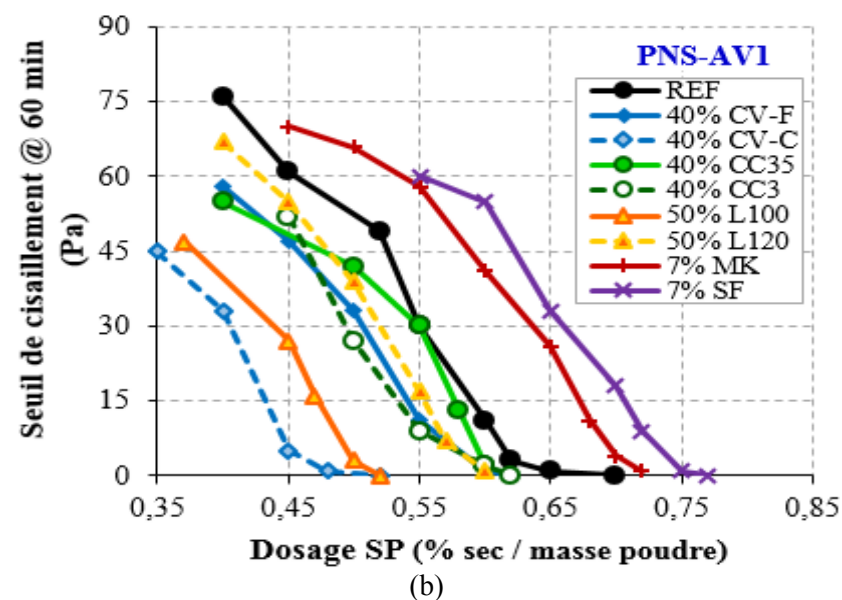
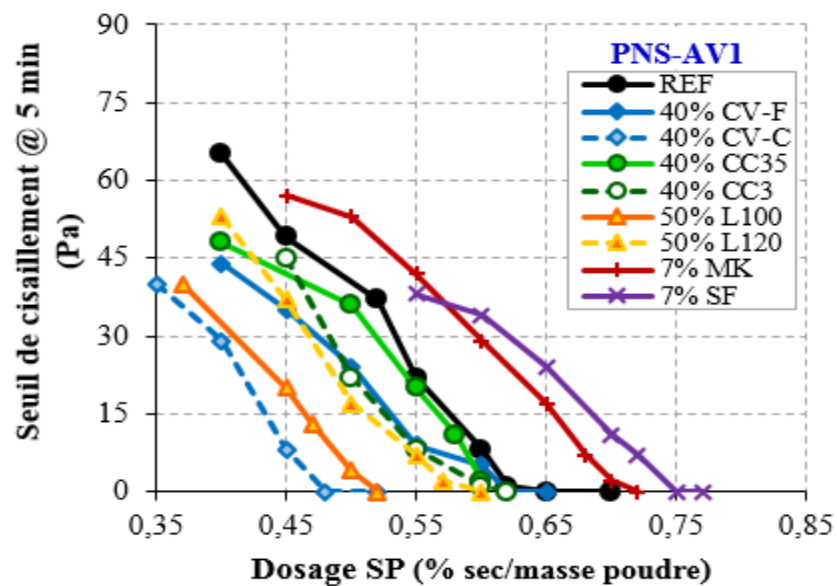


Figure 6.46 Seuil de cisaillement à 5 et 60 min des coulis contenant les poudres avec des taux de remplacement maximaux en présence de PNS-AV1

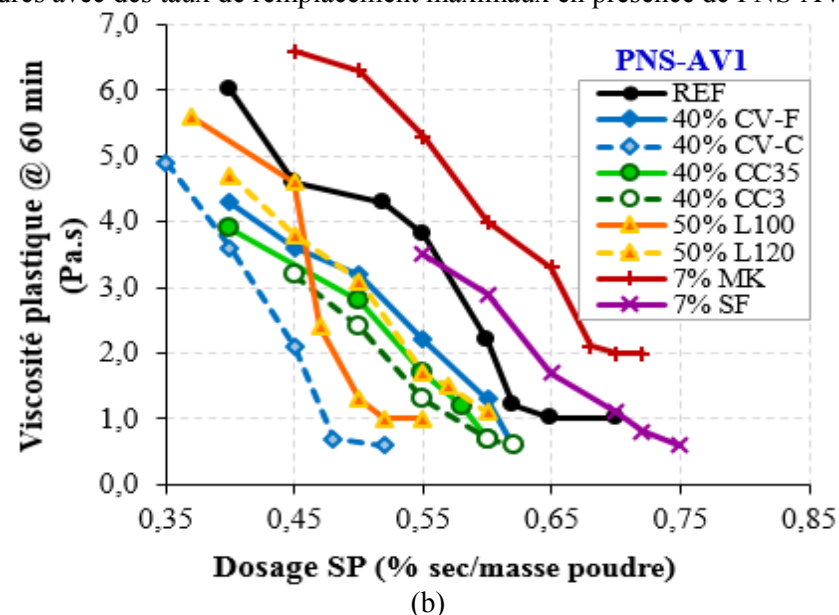
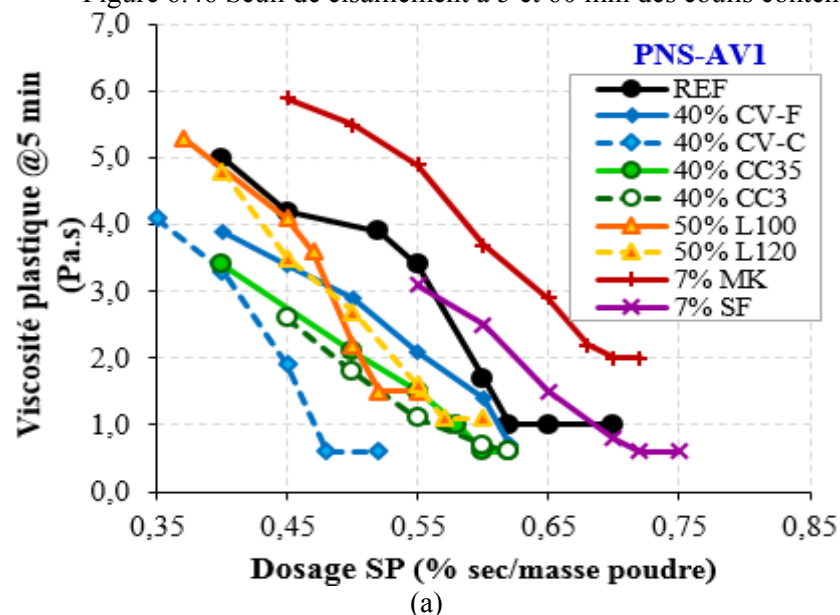


Figure 6.47 Viscosité plastique à 5 et 60 min des coulis contenant les poudres avec des taux de remplacement maximaux en présence de PNS-AV1

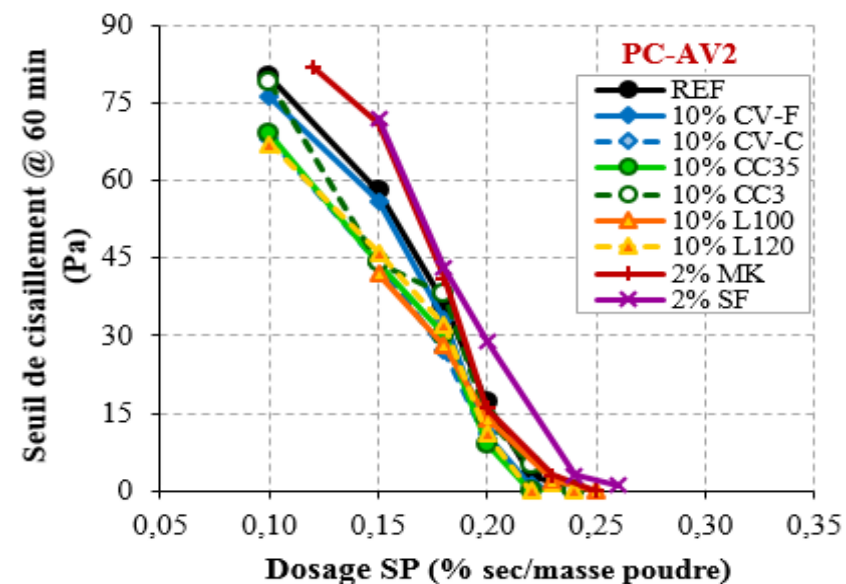
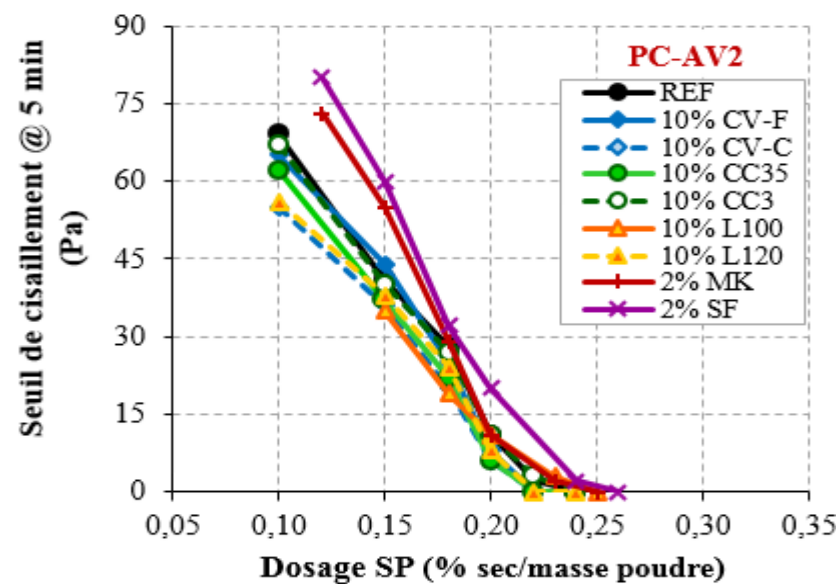


Figure 6.48 Seuil de cisaillement à 5 et 60 min des coulis contenant les poudres avec des taux de remplacement minimaux en présence de PC-AV2

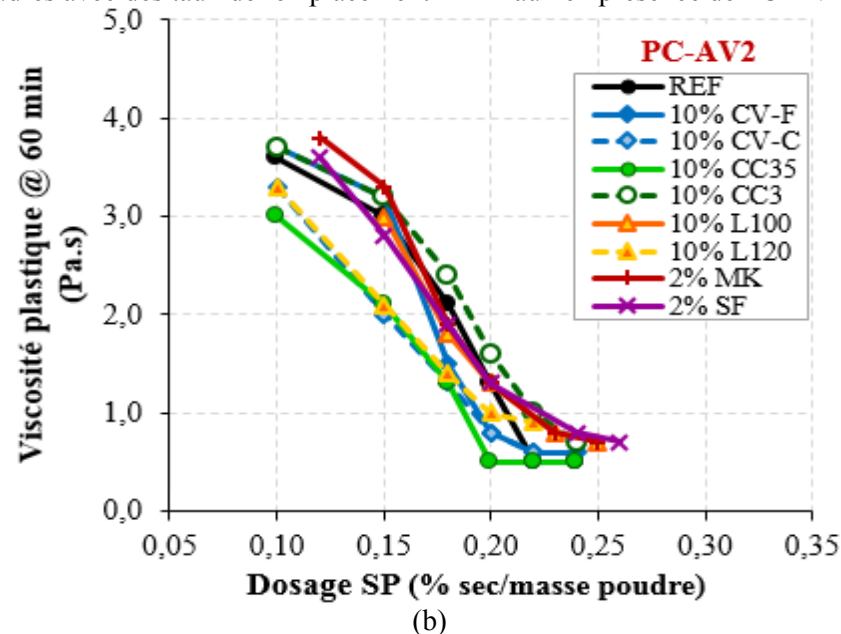
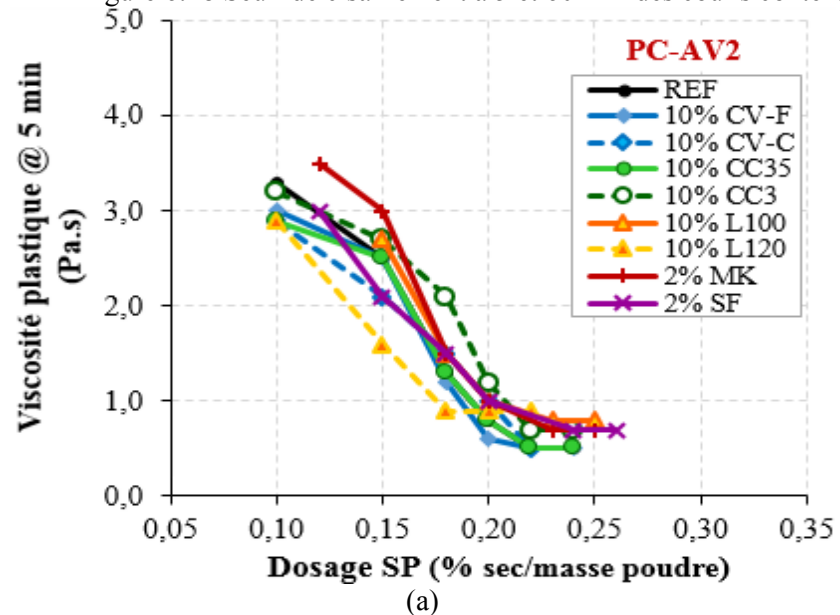
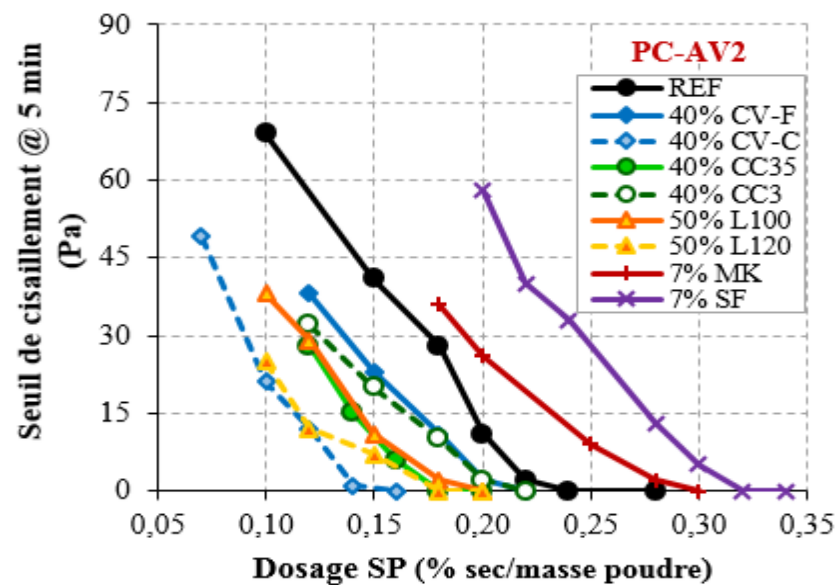
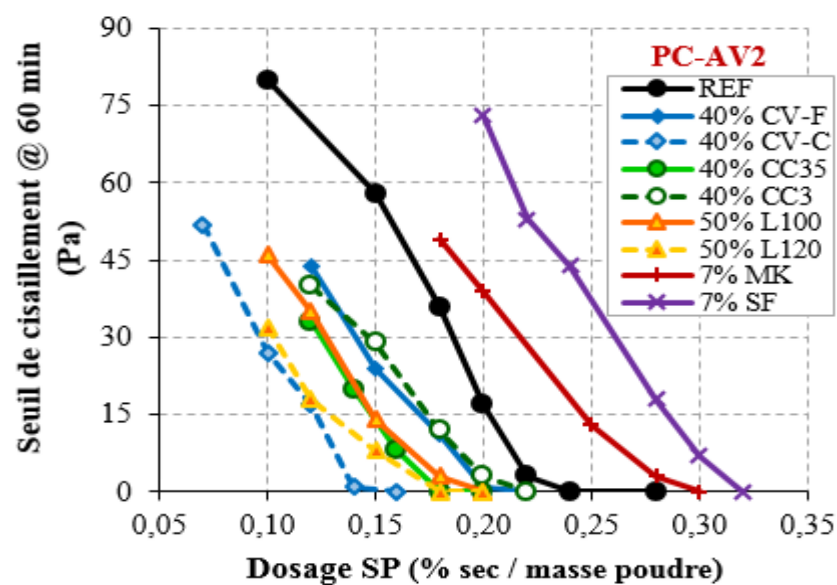


Figure 6.49 Viscosité plastique à 5 et 60 min des coulis contenant les poudres avec des taux de remplacement minimaux en présence de PC-AV2

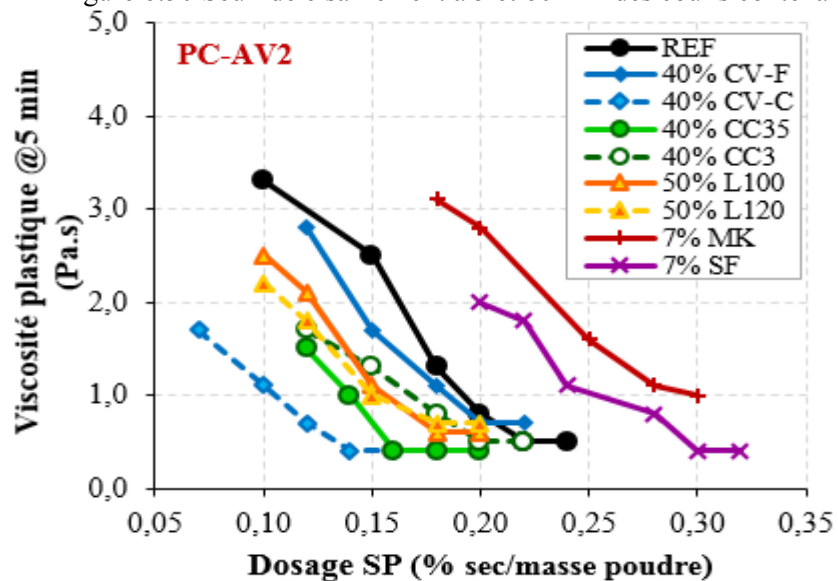


(a)

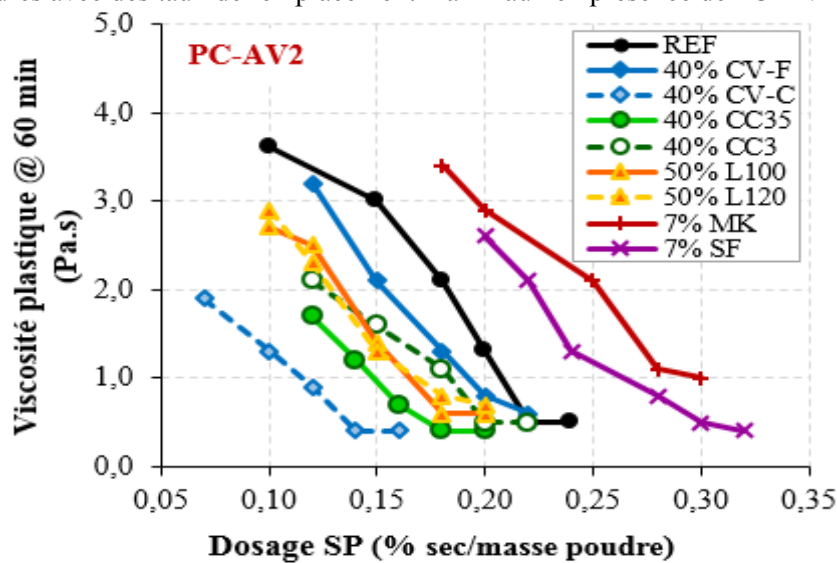


(b)

Figure 6.50 Seuil de cisaillement à 5 et 60 min des coulis contenant les poudres avec des taux de remplacement maximaux en présence de PC-AV2



(a)



(b)

Figure 6.51 Viscosité plastique à 5 et 60 min des coulis contenant les poudres avec des taux de remplacement maximaux en présence de PC-AV2

6.7 EFFET DU CHANGEMENT DES FRACTIONS VOLUMÉTRIQUES

Dans l'industrie du béton, il est plus commun d'utiliser des pourcentages de remplacement par masse de ciment que des pourcentages de remplacement par volume de ciment dû à la simplicité du calcul. Par souci de reproduire ce qui se fait généralement en réalité, le choix du remplacement des AM par masse était privilégié du remplacement par volume. Pour valider cette décision, des tests préliminaires ont été effectués à l'échelle des MBE pour souligner la différence entre les deux remplacements. Le tableau 6.8 résume les variations du volume total de pâte dans le MBE ainsi que l'augmentation dans le volume de poudre résultant du remplacement massique. Il est évident que ce sont les poudres présentant les plus faibles densités avec des pourcentages de remplacement élevés qui ont plus de répercussion sur l'augmentation du volume de pâte dans les MBE. Toutefois, cette augmentation n'a pas dépassé 2,2% et 3% pour 40% de remplacement de ciment par la CV-F et la CV-C, respectivement. Par contre, les augmentations les plus importantes dans le volume de poudre du remplacement massique par rapport au remplacement volumique sont de 9% et 12% avec 40% de CV-F et 40% de CV-C, respectivement. Afin de quantifier et clarifier l'effet de cette différence sur les propriétés rhéologiques des MBE, une comparaison entre les résultats du remplacement massique avec celle du remplacement volumique a été faite pour les deux cendres volantes en présence de PNS-AV1. Les résultats sont résumés sur le tableau 6.9. Contrairement à ce qui été prévu, l'écart entre les résultats du remplacement massique par rapport au remplacement volumique est très limité. Pour des pourcentages de 10% et 20% de CV-F ou de CV-C, les résultats sont quasi-identiques. La différence la plus importante est notée dans le cas de 30% et 40% de CV-C où l'étalement des MBE par remplacement massique est supérieur de 3,6% à celui par remplacement volumique. Cette différence reste très limitée et ne peut en aucun cas interpréter l'amélioration de la fluidité par augmentation du volume total des poudres dans la pâte. La même constatation est notée pour la viscosité plastique, où les mélanges par remplacement massique semblent légèrement plus visqueux que ceux par remplacement volumique, ce qui peut être dû à la présence de plus de volume de poudre dans les mélanges avec le remplacement massique. Mais la différence est

encore une fois très limitée est ne peut être généralisée. De ces faits, il a été conclu ici que les résultats du remplacement massique du ciment par des AM s'approchent considérablement à ceux du remplacement volumique.

Tableau 6.8 Augmentation du volume total de la pâte dans les MBE et du volume total des poudres résultant des remplacements massique et volumique du ciment par des AM

AM	Densité (g/cm ³)	Remplacement maximal (%)	Sable/poudre	Augmentation volume total pâte (%)	Augmentation volume poudre (%)
Ciment GU	3,14	100	1,99	0,0	0,0
CV-F	2,36	40	1,76	2,2	9,2
CV-C	2,15	40	1,68	3,0	12,2
CC35	2,70	40	1,93	1,1	4,8
CC3	2,72	40	1,92	1,1	4,6
L100	2,93	50	1,96	0,6	2,8
L120	2,92	50	1,94	0,6	2,8
MK	2,50	7	1,87	0,3	1,4
SF	2,24	7	1,88	0,5	2,2

Tableau 6.9 Comparaison des résultats rhéologiques des MBE-AP résultant des remplacements massique et volumique du ciment par la CV-F et la CV-C en présence de PNS-AV1

Poudre	Remplacement (%)	Augmentation volume poudre (%)	Remplacement volumique			Remplacement massique		
			Φ^* (mm)	τ^\times (Pa)	μ_{pl}^\dagger (Pa.s)	Φ^* (mm)	τ^\times (Pa)	μ_{pl}^\dagger (Pa.s)
CV-F	10	2,6	260	15	3,8	256	16	4,2
	20	4,9	260	15	4,6	260	16	4,4
	30	7,1	265	11	5,3	265	12	4,6
	40	9,2	265	12	5,1	270	10	5,6
CV-C	10	3,5	260	13	3,5	260	15	3,7
	20	6,7	265	13	3,6	270	13	3,2
	30	9,6	275	11	2,8	285	10	2,7
	40	12,2	278	10	2,8	287	11	3,0

* Étalement \times Seuil de cisaillement \dagger Viscosité plastique

6.8 CONCLUSIONS

Le lien entre les différentes caractéristiques des AM (surface spécifique, distribution granulométrique, forme des particules, compacité granulaire et contribution des adjuvants) et les propriétés rhéologiques (seuil de cisaillement et viscosité plastique) des MBE a été évalué. En se basant sur les résultats trouvés, les points suivants sont à souligner :

- La surface spécifique des poudres mesurée par BET semble avoir un lien plus direct sur le seuil de cisaillement que sur la viscosité plastique. Plus la surface spécifique est importante, plus le seuil de cisaillement est important. Cependant, l'effet n'est pas très apparent pour des valeurs BET entre 1000 et 1600 m²/kg.
- Il est très ambigu de tirer des conclusions vis-à-vis de la relation entre la granulométrie des AM et les propriétés rhéologiques des MBE. Il a été noté que d'une part, une distribution granulométrique étalée due au remplacement partiel du ciment par la cendre volante (valeurs du coefficient d'uniformité (n) entre 0,946 et 0,708) correspond à une augmentation de la fluidité des deux types de MBE. Alors que d'autre part, une distribution un peu plus étroite due au remplacement d'une partie de ciment par l'un des deux laitiers (valeurs de n entre 0,946 et 1,045) peut aussi correspondre à une augmentation de la fluidité. De plus, la présence de 7% de FS a aussi donnée une courbe granulométrique plus étalée ($n = 0,777$), mais le fait que la FS présente une surface spécifique très importante, ceci a eu pour effet de masquer complètement la contribution de la forme de la courbe granulométrique.
- Une bonne tendance entre la forme des particules et la viscosité plastique des deux types de MBE a été notée. Plus la forme est angulaire et irrégulière (facteur de Ferret autour de 0,4), plus la viscosité obtenue est importante et plus la forme est sphérique (facteur de Ferret proche de 1), plus la viscosité plastique est réduite.
- La Compacité granulaire a été déterminée par la méthode humide. Une comparaison a été effectuée sur la contribution des différents AM en présence de deux types de SP puis en présence de deux combinaisons SP-AV. Tous les AM avec les différents pourcentages et

les divers cas d'adjuvants ont contribué à améliorer l'état de la compacité granulaire des pâtes.

- L'augmentation de la compacité granulaire est plus importante en présence de PC et de PC-AV2 comparativement avec PNS et PNS-AV1. Les compacités maximales obtenues pour les mélanges références sont de 0,577 et 0,532 en présence de PNS et PNS AV1 et de 0,614 et 0,586 en présence de PC et PC-AV2, respectivement.
- La présence d'un agent de viscosité a, d'une part, diminué légèrement la compacité granulaire des coulis mais a aussi, d'autre part, augmenté plus considérablement le rapport E/P correspondant à la compacité maximale. Les rapports E/P correspondant à la compacité maximale des mélanges références sont de 0,620 et 0,525 en présence de PNS et PC et de 0,800 et 0,625 en présence de PNS-AV1 et PC-AV2.
- La poudre qui a montré la meilleure performance au niveau de la compacité granulaire est le MK suivi par la FS, CC35 puis CC3. Avec 7% de MK; la compacité granulaire obtenue est de 0,615, 0,635, 0,587 et 0,620 en comparaison avec 0,577, 0,614, 0,532 et 0,586 pour les mélanges références en présence de PNS, PC, PNS-AV1 et PC-AV2, en ordre respectif.
- Le filler CC3 est beaucoup plus fins que le filler CC35, mais pour un remplacement partiel de 40% de ce dernier, la compacité granulaire est améliorée de 14%, 8%, 17% et 10% comparativement à 12%, 4%, 13% et 3% pour le CC3 en présence de PNS, PC, PNS-AV1 et PC-AV2, respectivement.
- L'amélioration de la compacité granulaire a une étroite relation avec la taille moyenne des particules. Plus la taille des particules est grossière ou fine, plus la compacité granulaire résultante est plus importante.
- L'interaction ciment-AM-SP a été évaluée en déterminant le point de saturation des coulis contenant les taux de remplacement minimaux et maximaux déjà utilisés dans l'étude des ciments binaires. Les points de saturation ont été déterminés en présence de SP seul (PNS et PC) puis en présence de SP-AV (PNS-AV1 et PC-AV2). Pour des faibles taux de remplacement, les différents AM n'ont pas un effet significatif sur la demande en SP et

probablement sur la quantité de SP adsorbée, ceci sans et avec la présence d'un AV. Généralement, tous les points de saturation ont été similaires ou proches de ceux des coulis références qui sont de 0,55%, 0,18%, 0,62% et 0,22% pour le PNS, PC, PNS-AV1 et PC-AV2, en ordre respectif.

- Grâce au mode d'action principale qui est la répulsion stérique des PC, leur point de saturation est beaucoup plus faible en comparaison avec le PNS. Dépendamment de la poudre utilisée, la demande en PNS peut être de deux à trois fois plus importante que celle en PC.
- La présence d'un AV a eu pour effet d'augmenter la demande en SP (PNS et PC) pour diminuer le seuil de cisaillement et d'augmenter par conséquent les points de saturation. Cependant, la tendance des AM/filler à augmenter ou à diminuer la demande en SP est restée quasiment la même.
- Pour des taux de remplacement maximaux, mis à part la FS et le MK, tous les AM ont présenté des demandes en SP proches ou plus faibles que celles des coulis de référence. La poudre qui a présenté la plus faible demande en SP est la CV-C. les points de saturation sont de 0,45%, 0,12%, 0,48% et 0,14% comparativement à 0,55%, 0,18%, 0,62% et 0,22% pour les mélanges de référence en présence de PNS, PC, PNS-AV1 et PC-AV2, respectivement.
- La demande en PNS et PC des coulis contenant 40% CV-F est de 25% et 36% plus importante que celle des coulis contenant 40% CV-C. Ceci peut signifier que l'adsorption des deux SP est plus importante sur les particules de la CV-F que sur les particules de la CV-C.
- La finesse du laitier n'a pas montré un effet notable sur la demande en PC que ce soit sans ou avec la présence d'un AV. La présence de 50% de L100 ou L120 résulte à des points de saturation en PC de 0,12% et 0,18% avec et sans AV, respectivement. Tandis qu'en présence de PNS, il semble que le laitier plus fin, L120, procure plus de sites actifs pour l'adsorption du PNS, ce qui résulte à un point de saturation comparable à celui du coulis de référence.

- Le PC semble être plus efficace en comparaison avec le PNS en présence des fillers calcaires. Une diminution de la demande en PC d'ordre de 18% est notée avec 40% CC35 ou 40% CC3 alors que la diminution est de 3% et 10% pour le PNS avec 40% CC35 ou 40% CC3, respectivement. Il semble que le PNS s'adsorbe plus intensément sur les particules des fillers que le PC.
- La demande en SP a augmenté plus au moins significativement dans les coulis contenant 7% FS ou 7% MK. L'augmentation peut aller jusqu'à 50%, ce qui a été noté pour le PC en présence de 7% de FS. Cette augmentation est liée directement à l'importante surface spécifique de ces deux AM.

CHAPITRE 7 : EFFET DES CIMENTS TERNAIRES SUR LES PROPRIÉTÉS DES MBE

7.1 INTRODUCTION

Le développement réussi des bétons fluides à haute performance à rhéologie adaptée (BFHPRA) nécessite de trouver un bon compromis entre le seuil de cisaillement visé et la viscosité plastique adéquate pour résister à la ségrégation. Étant donné que ces deux exigences sont controversées, maîtriser l'effet des différents ingrédients qui entrent dans la formulation devient la clé de la réussite de ces bétons. L'utilisation des AM est recommandée dans la formulation des BFHPRA. Comme déjà constaté à travers les résultats des chapitres 5 et 6, l'incorporation d'un seul AM dans la formulation des MBE-AP ou MBE-SF présente beaucoup d'avantages mais peut par la même occasion entraîner des lacunes. Augmentation de la demande en SP, diminution importante de la viscosité plastique, retard de la prise ou diminution de la résistance à jeune âge. Pour surmonter à ces différentes lacunes deux types d'AM ou un ajout minéral et un filler peuvent être combinés.

Il s'agit ici d'étudier l'effet des différentes combinaisons ternaires en présence des adjuvants chimiques (SP, AV) sur les propriétés rhéologiques, la cinétique d'hydratation et le développement des résistances à la compression (f'_c) des MBE en utilisant la méthode des plans d'expérience. Deux types de MBE (MBE-AP et MBE-SF) sont étudiés en présence de PNS et PC avec/sans leurs AV compatibles. Dans cette partie d'étude, la demande en SP est déterminée pour avoir un étalement constant pour chaque type de MBE. Les formulations de tous les MBE-AP (PNS-AV1 et PC-AV2) et MBE-SF (PNS et PC) ternaires sont les mêmes que celles des MBE respectifs de référence représentée sur le tableau 4.9 où la différence réside dans la substitution massique du ciment par les différents pourcentages en AM et de la demande en SP pour atteindre la fluidité visée pour chaque MBE. Comme il a été déjà mentionné dans le chapitre 4 et afin d'éviter les variabilités incontrôlées, le dosage nécessaire de SP pour avoir l'étalement souhaité doit être ajoutée en totalité initialement lors du malaxage et non pas ajustée au fur et à mesure.

Les résultats de ce chapitre mettront la lumière sur la performance, l'interaction ainsi que les limitations qui peuvent résulter de l'utilisation de deux différents AM en présence des adjuvants chimiques (SP, AV). Par la suite, les résultats trouvés sur les deux types de MBE seront exploités et validés à l'échelle des bétons correspondants.

7.2 PLAN D'EXPÉRIENCE UTILISÉ

Pour limiter le nombre de MBE fabriqués, la méthode des plans d'expérience est utilisée dans cette partie d'étude. Un plan de surface de réponse de 3^2 (deux facteurs à 3 niveaux) est adopté pour les deux types de MBE (MBE-AP et MBE-SF) afin de mettre en évidence la contribution des variables expérimentales, leurs interactions ainsi que la prédiction des réponses à l'intérieur du domaine expérimental. De plus, ce plan permet une estimation efficace des coefficients du premier et deuxième ordre. Les résultats obtenus dans le chapitre 5 ont mené à classer les poudres étudiées en deux groupes, les poudres à faible réactivité (CV-F, CV-C, CC35, CC3, L100 et L120) et les poudres à réactivité élevée (FS et MK). Les variables expérimentales sont le remplacement partiel du ciment par une poudre à réactivité élevée avec une poudre à faible réactivité (figure 7.1)

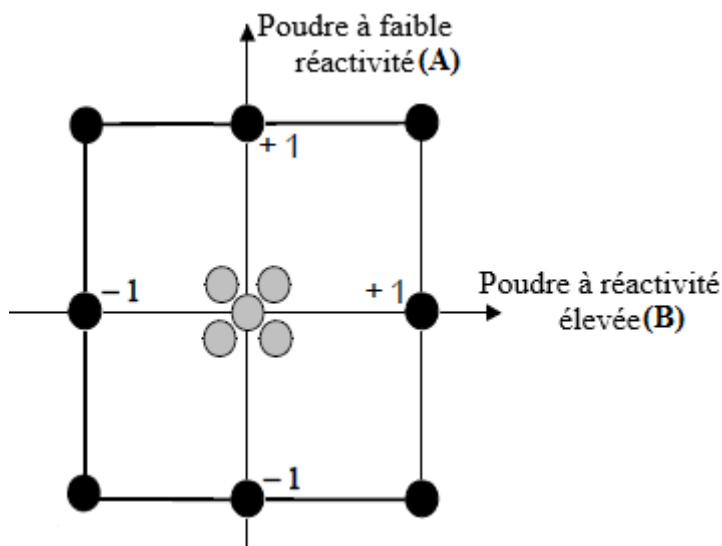


Figure 7.1 Illustration du plan factoriel 3^2 utilisé pour les ciments ternaires

7.3 EFFET DES CIMENTS TERNAIRES SUR LES PROPRIÉTÉS DES MBE-AP

Quatre différentes combinaisons (CV-F – SF, CV-F – MK, L100 – SF, CC3 – SF) sont sélectionnées pour étudier l’effet des ciments ternaires sur les propriétés des MBE-AP. Le rapport E/P (eau/poudre) utilisé est de 0,45. Treize mélanges sont préconisés pour chaque combinaison ternaire dont cinq mélanges sont la répétition du point central (figure 7.1). Les quatre combinaisons ont été utilisées à tour de rôle en présence de PNS-AV1 et PC-AV2. Les dosages en AV1 et AV2 sont gardés constants (même dosage utilisé pour MBE-AP de référence). Le dosage en SP est déterminé pour avoir un étalement constant de 260 ± 10 mm pour les MBE-AP ternaires en présence du couple PNS-AV1 et de 240 ± 10 mm pour les MBE-AP ternaires en présence du couple PC-AV2. Comme il a été déjà mentionné dans l’annexe A (§ A.1), ces deux mélanges ont présenté quasiment le même seuil de cisaillement. Les variables expérimentales avec leurs taux de remplacement, les combinaisons sélectionnées ainsi que les réponses mesurées sont récapitulés sur le tableau 7.1.

Tableau 7.1 Valeurs codées et valeurs absolues des variables expérimentales pour les différentes combinaisons des MBE-AP ternaires

Variables expérimentales		Niveaux			Combinaisons	Réponses
		Faible (-1)	Central (0)	Élevé (+1)		
Poudre à faible réactivité A)	CV-F (%)	25	40	55	1) CV-F – SF (PNS) 2) CV-F – SF (PC) 3) CV-F – MK (PNS)	- Demande en SP - Seuil de cisaillement - Viscosité plastique
	L100 (%)	25	37,5	50	4) CV-F – MK (PNS)	- Ressuage forcé
	CC3 (%)	5	17,5	30	5) L100 – SF (PNS) 6) L100 – SF (PNS)	- Perte de fluidité - Dégagement de chaleur
Poudre à réactivité élevée (B)	SF (%)	2	4	7	7) CC3 – SF (PNS)	- Temps de prise
	MK (%)	2	8,5	15	8) CC3 – SF (PNS)	- $f'_{c1}, f'_{c28}, f'_{c91}$

7.3.1 Modèles statistiques dérivés

L'analyse statistique a été faite avec le logiciel "Design-Expert". Les modèles statistiques dérivés avec leurs coefficients de corrélation ainsi que les valeurs de probabilité obtenues pour les différentes réponses sont résumés sur les tableaux 7.2 à 7.8. Pour chaque modèle, les facteurs (A et B) sont affectés par des paramètres d'estimation exprimés en unités codées, ce qui permet de comparer la contribution d'un facteur par rapport à un autre. Une estimation de signe négatif (-) signifie que le facteur diminue la valeur de la réponse tandis qu'une estimation de signe positif (+) signifie que le facteur est proportionnel à la réponse. Les facteurs influant sont déterminés avec une valeur de probabilité. Cette valeur est limitée à 10%. Des valeurs de probabilité " $(\text{Prob.}) > |t|$ " inférieures à 0,05 indiquent qu'il y a 95% de chance que les termes en question aient un effet significatif sur la réponse. Des valeurs supérieures à 0,1000 indiquent que les termes du modèle n'ont pas un effet significatif.

La plupart des modèles statistiques obtenus pour les réponses des MBE-AP ternaires sont linéaires, ce qui signifie qu'il n'y a pas d'interaction entre les facteurs A et B. À l'exception du temps de prise (TP) pour la combinaison CV-F – FS (PC) où le modèle quadratique était le plus approprié. Les résultats du ressuage forcé (RF) pour les combinaisons CV-F – FS (PNS), CV-F – MK (PNS), L100 – FS (PNS) et CC3 – FS (PNS) indiquent que cette réponse est non-modélisable et que c'est la valeur moyenne qui est prise en considération. Des transformations ont été requises pour la stabilisation de certains modèles. Par exemple, pour la résistance à la compression à un jour (f'_{c1}), la transformation racine carrée avec une constante k de 0,5 était utilisée avec les combinaisons CV-F – FS (PC) et CV-F – MK (PNS) et la transformation du logarithme naturel était utilisée avec la combinaison CV-F – MK (PC).

La majorité des réponses des huit combinaisons ternaires ont présenté un coefficient de corrélation (R^2) assez élevé. Pour la demande en SP, le ressuage forcé, le temps de prise et les résistances à la compression à 28 et 91 jours (f'_{c28} et f'_{c91}), le coefficient de corrélation est compris entre 0,80 et 0,99, dépendamment de la combinaison. En ce qui concerne la viscosité plastique et f'_{c1} , le coefficient de corrélation est légèrement moins élevé (entre 0,70 à 0,86).

Les tableaux 7.9 à 7.15 récapitulent la représentation mathématique des différents modèles obtenus. Ces équations permettent de tracer les diagrammes des contours pour chaque réponse en fonction de la combinaison ternaire. Les diagrammes sont présentés dans la section suivante.

Tableau 7.2 Modèles statistiques pour la demande en SP des huit combinaisons des MBE-AP

Demande en SP								
Combinaison	CV-F – FS (PNS)		CV-F – FS (PC)		CV-F – MK (PNS)		CV-F – MK (PC)	
	$R^2 = 0,87$		$R^2 = 0,97$		$R^2 = 0,91$		$R^2 = 0,93$	
Paramètre	Estimation	Prob.> t	Estimation	Prob.> t	Estimation	Prob.> t	Estimation	Prob.> t
Constante	0,62		0,33		0,65		0,26	
A	0,056	0,0001	0,083	0,0001	-0,016	0,0484	0,014	0,0004
B	-0,017	0,032	0,0087	0,0978	0,082	0,0001	0,022	0,0001
Combinaison	L100 – FS (PNS)		L100 – FS (PC)		CC3 – FS (PNS)		CC3 – FS (PC)	
	$R^2 = 0,93$		$R^2 = 0,97$		$R^2 = 0,87$		$R^2 = 0,99$	
Paramètre	Estimation	Prob.> t	Estimation	Prob.> t	Estimation	Prob.> t	Estimation	Prob.> t
Constante	0,49		0,29		0,59		0,32	
A	-0,030	0,0089	-0,013	0,0007	-0,014	0,3125	-0,014	0,0001
B	0,100	0,0001	0,051	0,0001	0,106	0,0001	0,071	0,0001

Tableau 7.3 Modèles statistiques pour μ_{pl} des huit combinaisons des MBE-AP

Viscosité plastique (μ_{pl})								
Combinaison	CV-F – FS (PNS)		CV-F – FS (PC)		CV-F – MK (PNS)		CV-F – MK (PC)	
	$R^2 = 0,80$		$R^2 = 0,72$		$R^2 = 0,71$		$R^2 = 0,81$	
Paramètre	Estimation	Prob.> t	Estimation	Prob.> t	Estimation	Prob.> t	Estimation	Prob.> t
Constante	3,94		1,59		4,76		2,91	
A	0,530	0,0001	-0,075	0,0718	0,480	0,0163	0,150	0,0264
B	-0,403	0,0009	-0,175	0,0008	0,920	0,0001	0,350	0,0001

Tableau 7.4 Modèles statistiques pour μ_{pl} des huit combinaisons des MBE-AP (suite)

Viscosité plastique (μ_{pl})								
Combinaison	L100 – FS (PNS)		L100 – FS (PC)		CC3 – FS (PNS)		CC3 – FS (PC)	
	$R^2 = 0,70$		$R^2 = 0,70$		$R^2 = 0,76$		$R^2 = 0,86$	
Paramètre	Estimation	Prob.> t	Estimation	Prob.> t	Estimation	Prob.> t	Estimation	Prob.> t
Constante	3,03		1,27		2,42		1,13	
A	0,017	0,7613	0,018	0,6166	-0,220	0,0083	-0,100	0,0053
B	-0,250	0,0001	-0,165	0,0009	-0,300	0,0011	-0,200	0,0001

Tableau 7.5 Modèles statistiques pour le ressuage forcé des huit combinaisons des MBE-AP

Ressuage force (RF)								
Combinaison	CV-F – FS (PNS)		CV-F – FS (PC)		CV-F – MK (PNS)		CV-F – MK (PC)	
	-		$R^2 = 0,86$		-		$R^2 = 0,84$	
Paramètre	Estimation	Prob.> t	Estimation	Prob.> t	Estimation	Prob.> t	Estimation	Prob.> t
Constante	3,14		19,70		2,38		35,60	
A	NS	NS	-	-	NS	NS	-1,570	0,0228
B	NS	NS	-9,260	0,0001	NS	NS	-4,000	0,0001
Combinaison	L100 – FS (PNS)		L100 – FS (PC)		CC3 – FS (PNS)		CC3 – FS (PC)	
	-		$R^2 = 0,75$		-		$R^2 = 0,98$	
Paramètre	Estimation	Prob.> t	Estimation	Prob.> t	Estimation	Prob.> t	Estimation	Prob.> t
Constante	4,21		21,90		3,90		2,72	
A	NS	NS	NS	NS	NS	NS	-0,150	0,0228
B	NS	NS	-4,320	0,0001	NS	NS	-0,330	0,0001

NS : non significatif

Tableau 7.6 Modèles statistiques pour le temps de prise des huit combinaisons des MBE-AP

Temps de prise (TP)								
	CV-F – FS (PNS)		CV-F – FS (PC)		CV-F – MK (PNS)		CV-F – MK (PC)	
	$R^2 = 0,94$		$R^2 = 0,99$		$R^2 = 0,68$		$R^2 = 0,70$	
Paramètre	Estimation	Prob.> t	Estimation	Prob.> t	Estimation	Prob.> t	Estimation	Prob.> t
Constante	8,37		12,92		14,70		11,50	
A	1,570	0,0001	1,630	0,0001	0,530	0,6439	1,450	0,0016
B	-1,270	0,0001	-1,670	0,0001	-2,400	0,0024	-0,770	0,0464
AB	-0,530	0,0110	0,095	0,4314	NS	NS	NS	NS
A ²	NS	NS	-0,240	0,1229	NS	NS	NS	NS
B ²	NS	NS	-0,520	0,0067	NS	NS	NS	NS
	Temps de prise (TP)				$(TP)^{-2,84}$		$1/\sqrt{f'_c} - 0,5$	
	L100 – FS (PNS)		L100 – FS (PC)		CC3 – FS (PNS)		CC3 – FS (PC)	
	-		-		$R^2 = 0,91$		$R^2 = 0,96$	
Paramètre	Estimation	Prob.> t	Estimation	Prob.> t	Estimation	Prob.> t	Estimation	Prob.> t
Constante	6,21		9,50		0,011		0,40	
A	NS	NS	NS	NS	0,0042	0,0001	0,050	0,0001
B	NS	NS	NS	NS	-0,0020	0,0013	-0,023	0,0001

Tableau 7.7 Modèles statistiques pour f'_{c1} des huit combinaisons des MBE-AP

	f'_{c1}		$\sqrt{f'_c} + 0,5$		$\sqrt{f'_c} + 0,5$		$\ln(f'_{c1})$	
Combinaison	CV-F – FS (PNS)		CV-F – FS (PC)		CV-F – MK (PNS)		CV-F – MK (PC)	
	$R^2 = 0,84$		$R^2 = 0,98$		$R^2 = 0,50$		$R^2 = 0,97$	
Paramètre	Estimation	Prob.> t	Estimation	Prob.> t	Estimation	Prob.> t	Estimation	Prob.> t
Constante	2,75		2,35		1,25		1,33	
A	-1,620	0,0001	-0,680	0,0001	-0,340	0,0293	-0,700	0,0001
B	0,877	0,0021	-0,120	0,0014	0,250	0,0864	-0,081	0,0681

Tableau 7.8 Modèles statistiques pour f'_{c1} des huit combinaisons des MBE-AP (suite)

Combinaison	f'_{c1}							
	L100 – FS (PNS)		L100 – FS (PC)		CC3 – FS (PNS)		CC3 – FS (PC)	
	$R^2 = 0,78$		$R^2 = 0,91$		$R^2 = 0,70$		$R^2 = 0,93$	
Paramètre	Estimation	Prob.> t	Estimation	Prob.> t	Estimation	Prob.> t	Estimation	Prob.> t
Constante	5,60		9,20		11,00		13,60	
A	-1,580	0,0001	-2,840	0,0001	-0,900	0,0077	-2,750	0,0001
B	NS	NS	-0,690	0,0419	-0,570	0,0567	-0,700	0,0200

NS : non significatif

Tableau 7.9 Modèles statistiques pour f'_{c28} des huit combinaisons des MBE-AP

Combinaison	f'_{c28}							
	CV-F – FS (PNS)		CV-F – FS (PC)		CV-F – MK (PNS)		CV-F – MK (PC)	
	$R^2 = 0,93$		$R^2 = 0,98$		$R^2 = 0,98$		$R^2 = 0,91$	
Paramètre	Estimation	Prob.> t	Estimation	Prob.> t	Estimation	Prob.> t	Estimation	Prob.> t
Constante	42,5		42,45		33,0		41,6	
A	-8,80	0,0001	-13,18	0,0001	-9,63	0,0001	-10,70	0,0001
B	5,87	0,0001	2,70	0,0005	NS	NS	-3,77	0,0069
Combinaison	L100 – FS (PNS)		L100 – FS (PC)		CC3 – FS (PNS)		CC3 – FS (PC)	
	$R^2 = 0,77$		$R^2 = 0,85$		$R^2 = 0,82$		$R^2 = 0,92$	
Paramètre	Estimation	Prob.> t	Estimation	Prob.> t	Estimation	Prob.> t	Estimation	Prob.> t
Constante	59,7		67,8		59,5		55,0	
A	-0,72	0,2065	-3,10	0,0001	-8,33	0,0001	10,1	0,0001
B	2,6	0,0011	1,31	0,0226	2,56	0,697	2,66	0,0203

NS : non significatif

Tableau 7.10 Modèles statistiques pour f'_{c91} des huit combinaisons des MBE-AP

f'_{c91}								
Combinaison	CV-F – FS (PNS)		CV-F – FS (PC)		CV-F – MK (PNS)		CV-F – MK (PC)	
	$R^2 = 0,85$		$R^2 = 0,93$		$R^2 = 0,62$		$R^2 = 0,96$	
Paramètre	Estimation	Prob.> t	Estimation	Prob.> t	Estimation	Prob.> t	Estimation	Prob.> t
Constante	53,2		59,7		43,4		49,6	
A	-7,87	0,0001	-9,95	0,0001	-10,33	0,0013	-12,63	0,0001
B	6,20	0,0002	1,47	0,1098	NS	NS	-3,10	0,0028
Combinaison	L100 – FS (PNS)		L100 – FS (PC)		CC3 – FS (PNS)		CC3 – FS (PC)	
	$R^2 = 0,80$		$R^2 = 0,80$		$R^2 = 0,87$		$R^2 = 0,98$	
Paramètre	Estimation	Prob.> t	Estimation	Prob.> t	Estimation	Prob.> t	Estimation	Prob.> t
Constante	70,7		77,3		56,0		61,1	
A	-4,42	0,0004	-4,48	0,0002	-9,61	0,0001	-11,42	0,0001
B	2,99	0,0057	2,47	0,0112	3,43	0,0215	1,50	0,0232

NS : non significatif

Tableau 7.11 Représentation mathématique des modèles obtenus pour la demande en SP des huit combinaisons des MBE-AP

Combinaison	Type de SP	Équation finale de la demande en SP en valeurs codées	R^2
CV-F – FS	PNS	$SP (\%) = 0,62 - 0,017 \times CV-F + 0,056 \times FS$	0,87
	PC	$SP (\%) = 0,33 + 0,0087 \times CV-F + 0,083 \times FS$	0,97
CV-F – MK	PNS	$SP (\%) = 0,65 - 0,016 \times CV-F + 0,082 \times MK$	0,91
	PC	$SP (\%) = 0,26 + 0,014 \times CV-F + 0,022 \times MK$	0,93
L100 – FS	PNS	$SP (\%) = 0,49 - 0,030 \times L100 + 0,100 \times FS$	0,93
	PC	$SP (\%) = 0,29 - 0,013 \times L100 + 0,051 \times FS$	0,97
CC3 – FS	PNS	$SP (\%) = 0,59 - 0,014 \times CC3 + 0,106 \times FS$	0,87
	PC	$SP (\%) = 0,32 - 0,014 \times CC3 + 0,071 \times FS$	0,99

Tableau 7.12 Représentation mathématique des modèles obtenus pour la viscosité plastique des huit combinaisons des MBE-AP

Combinaison	Type de SP	Équation finale de μ_{pl} en valeurs codées	R^2
CV-F – FS	PNS	$\mu_{pl} \text{ (Pa.s)} = 3,94 + 0,530 \times \text{CV-F} - 0,403 \times \text{FS}$	0,80
	PC	$\mu_{pl} \text{ (Pa.s)} = 1,59 - 0,075 \times \text{CV-F} - 0,175 \times \text{FS}$	0,72
CV-F – MK	PNS	$\mu_{pl} \text{ (Pa.s)} = 4,76 + 0,480 \times \text{CV-F} + 0,920 \times \text{MK}$	0,71
	PC	$\mu_{pl} \text{ (Pa.s)} = 2,91 + 0,150 \times \text{CV-F} + 0,350 \times \text{MK}$	0,81
L100 – FS	PNS	$\mu_{pl} \text{ (Pa.s)} = 3,03 + 0,017 \times \text{L100} - 0,250 \times \text{FS}$	0,70
	PC	$\mu_{pl} \text{ (Pa.s)} = 1,27 + 0,018 \times \text{L100} - 0,165 \times \text{FS}$	0,70
CC3 – FS	PNS	$\mu_{pl} \text{ (Pa.s)} = 2,42 - 0,220 \times \text{CC3} - 0,300 \times \text{FS}$	0,76
	PC	$\mu_{pl} \text{ (Pa.s)} = 1,13 - 0,100 \times \text{CC3} - 0,200 \times \text{FS}$	0,86

Tableau 7.13 Représentation mathématique des modèles obtenus pour le ressuage forcé des huit combinaisons des MBE-AP

Combinaison	Type de SP	Équation finale du RF en valeurs codées	R^2
CV-F – FS	PNS	$\text{RF (\%)} = 3,14$	-
	PC	$\text{RF (\%)} = 19,7 - 9,260 \times \text{FS}$	0,86
CV-F – MK	PNS	$\text{RF (\%)} = 2,38$	-
	PC	$\text{RF (\%)} = 35,6 - 1,570 \times \text{CV-F} - 4,000 \times \text{MK}$	0,84
L100 – FS	PNS	$\text{RF (\%)} = 4,21$	-
	PC	$\text{RF (\%)} = 21,9 - 4,320 \times \text{FS}$	0,75
CC3 – FS	PNS	$\text{RF (\%)} = 3,90$	-
	PC	$\ln(\text{RF (\%)}) = 2,72 - 0,150 \times \text{CC3} - 0,330 \times \text{FS}$	0,98

Tableau 7.14 Représentation mathématique des modèles obtenus pour le temps de prise des huit combinaisons des MBE-AP

Combinaison	Type de SP	Équation finale du TP en valeurs codées	R ²
CV-F – FS	PNS	TP (h) = 8,40 + 1,570 × CV-F – 1,250 × FS – 0,530 × CV-F × FS	0,94
	PC	TP (h) = 12,90 + 1,630 × CV-F – 1,670 × FS – 0,240 × CV-F ² – 0,520 × FS ² + 0,095 × CV-F × FS	0,99
CV-F – MK	PNS	TP (h) = 14,70 + 0,530 × CV-F – 2,400 × MK	0,85
	PC	TP (h) = 11,50 + 1,450 × CV-F – 0,770 × MK	0,70
L100 – FS	PNS	TP (h) = 6,21	-
	PC	TP (h) = 9,50	-
CC3 – FS	PNS	(TP) ^{-2,84} (h) = 0,011 + 0,0042 × CC3 – 0,002 × FS	0,91
	PC	1/√f' _c – 0,5 (h) = 0,40 + 0,050 × CC3 – 0,023 × FS	0,96

Tableau 7.15 Représentation mathématique des modèles obtenus pour f'_{cl} des huit combinaisons des MBE-AP

Combinaison	Type de SP	Équation finale de f' _{cl} en valeurs codées	R ²
CV-F – FS	PNS	f' _{cl} (MPa) = 2,75 – 1,620 × CV-F + 0,877 × FS	0,84
	PC	√f' _c + 0,5 (MPa) = 2,35 – 0,660 × CV-F – 0,120 × FS	0,98
CV-F – MK	PNS	√f' _c + 0,5 (MPa) = 1,25 – 0,340 × CV-F + 0,250 × MK	0,50
	PC	ln (f' _{cl}) (MPa) = 1,33 – 0,700 × CV-F – 0,081 × MK	0,97
L100 – FS	PNS	f' _{cl} (MPa) = 5,60 – 1,580 × L100	0,78
	PC	f' _{cl} (MPa) = 9,20 – 2,840 × L100 – 0,690 × FS	0,91
CC3 – FS	PNS	f' _{cl} (MPa) = 11,00 – 0,900 × CC3 – 0,570 × FS	0,69
	PC	f' _{cl} (MPa) = 13,60 – 2,750 × CC3 – 0,700 × FS	0,93

Tableau 7.16 Représentation mathématique des modèles obtenus pour f'_{c28} des huit combinaisons des MBE-AP

Combinaison	Type de SP	Équation finale de f'_{c28} en valeurs codées	R ²
CV-F – FS	PNS	$f'_{c28} \text{ (MPa)} = 42,5 - 8,80 \times \text{CV-F} + 5,87 \times \text{FS}$	0,93
	PC	$f'_{c28} \text{ (MPa)} = 45,5 - 13,18 \times \text{CV-F} + 2,70 \times \text{FS}$	0,98
CV-F – MK	PNS	$f'_{c28} \text{ (MPa)} = 33,0 - 9,63 \times \text{CV-F}$	0,98
	PC	$f'_{c28} \text{ (MPa)} = 41,6 - 10,70 \times \text{CV-F} - 3,77 \times \text{MK}$	0,91
L100 – FS	PNS	$f'_{c28} \text{ (MPa)} = 59,7 - 0,72 \times \text{L100} + 2,60 \times \text{FS}$	0,77
	PC	$f'_{c28} \text{ (MPa)} = 67,8 - 3,10 \times \text{L100} + 1,31 \times \text{FS}$	0,85
CC3 – FS	PNS	$f'_{c28} \text{ (MPa)} = 59,5 - 8,33 \times \text{CC3} + 2,56 \times \text{FS}$	0,82
	PC	$f'_{c28} \text{ (MPa)} = 55,0 - 10,1 \times \text{CC3} + 2,66 \times \text{FS}$	0,92

Tableau 7.17 Représentation mathématique des modèles obtenus pour f'_{c91} des huit combinaisons des MBE-AP

Combinaison	Type de SP	Équation finale de f'_{c91} en valeurs codées	R ²
CV-F – FS	PNS	$f'_{c91} \text{ (MPa)} = 53,2 - 7,87 \times \text{CV-F} + 6,20 \times \text{FS}$	0,85
	PC	$f'_{c91} \text{ (MPa)} = 59,7 - 9,95 \times \text{CV-F} + 1,47 \times \text{FS}$	0,93
CV-F – MK	PNS	$f'_{c91} \text{ (MPa)} = 43,4 - 10,33 \times \text{CV-F}$	0,62
	PC	$f'_{c91} \text{ (MPa)} = 49,6 - 12,63 \times \text{CV-F} - 3,10 \times \text{MK}$	0,96
L100 – FS	PNS	$f'_{c91} \text{ (MPa)} = 70,7 - 4,42 \times \text{L100} + 2,99 \times \text{FS}$	0,80
	PC	$f'_{c91} \text{ (MPa)} = 77,3 - 4,48 \times \text{L100} + 2,47 \times \text{FS}$	0,80
CC3 – FS	PNS	$f'_{c91} \text{ (MPa)} = 56,0 - 9,61 \times \text{CC3} + 3,43 \times \text{FS}$	0,87
	PC	$f'_{c91} \text{ (MPa)} = 61,1 - 11,42 \times \text{CC3} + 1,50 \times \text{FS}$	0,98

7.3.2 Effet des ciments ternaires sur la demande en SP des MBE-AP

La figure 7.2 illustre les diagrammes de contour de la demande en SP des MBE-AP contenant différentes combinaisons ternaires. Les contours en trait plein concernent les mélanges en présence de PNS-AV1 et les contours en pointillés sont pour les mélanges en présence de PC-AV2. La demande en SP est exprimée en pourcentage d'extrait sec par rapport à la masse des

poudres. Les diagrammes de contour pour les huit combinaisons (figure 7.2) indiquent que l'effet de l'utilisation de deux différents AM en combinaison ternaire avec le ciment est la somme des effets individuels de chaque poudre observés dans les ciments binaires.

À cause de leur importante surface spécifique, l'augmentation du taux de remplacement de la poudre à réactivité élevée (2 à 7% FS ou 2 à 15% MK) semble avoir un effet plus considérable sur la demande en SP en comparaison avec la poudre à faible réactivité. D'après les modèles statistiques, la contribution de la FS dans l'augmentation de la demande en SP est de trois à sept fois plus importante pour le PNS et de quatre à neuf fois pour le PC que la contribution de la CV-F, le L100 ou encore le CC3. Quant au MK, sa contribution à augmenter la demande en PNS et PC est de deux et cinq fois, respectivement, que celle de la CV-F. De plus, pour un taux de remplacement donné en FS ou en MK, l'augmentation du pourcentage de la CV-F entraîne une légère réduction dans la demande en PNS et une très légère augmentation dans la demande en PC. Par exemple, pour un taux de remplacement de 2% de FS, l'accroissement de la substitution en CV-F de 25% à 55% a diminué les pourcentages en PNS de 0,58% à 0,54% et a augmenté la demande en PC de 0,24 à 0,26% (exprimés en extrait sec/masse des poudres). Ceci a été noté de même pour les ciments binaire en présence de la CV-F où les résultats ont été attribués au fait que le PC peut s'adsorber activement en présence du carbone imbrûlé que le PNS. Pour les combinaisons ternaires L100 – FS et CC3 – FS et quel que soit le type de SP (PNS ou PC), le L100 et le CC3 contribuent à diminuer la demande en SP mais de façon beaucoup moins significative que la FS. Par exemple, à 2% de FS, l'augmentation de la substitution en L100 de 25% à 50% ou en CC3 de 5% à 30% a fait diminuer la demande en PNS de 0,43% à 0,38% ou de 0,50% à 0,47%, respectivement, et diminuer celle en PC de 0,25% à 0,22% et de 0,27 à 0,25%, respectivement. Tandis que pour un taux de remplacement de 50% en L100 et de 30% en CC3, l'augmentation du pourcentage de la FS de 2% à 7% accroît la demande en PNS de 0,38% à 0,59% et de 0,47 à 0,68%, respectivement, et celle en PC de 0,22% à 0,32% et de 0,25 à 0,39%, respectivement.

7.3.3 Effet des ciments ternaires sur la viscosité plastique des MBE-AP

Les diagrammes de contour correspondant à la viscosité plastique (μ_{pl}) des MBE-AP ternaires sont illustrés sur la figure 7.3. Les modèles statistiques obtenus pour la μ_{pl} des huit combinaisons sont des modèles linéaires et aucune interaction n'est notée entre les deux poudres combinées. De plus, comme il a été noté pour les systèmes binaires, les viscosités plastiques des MBE-AP

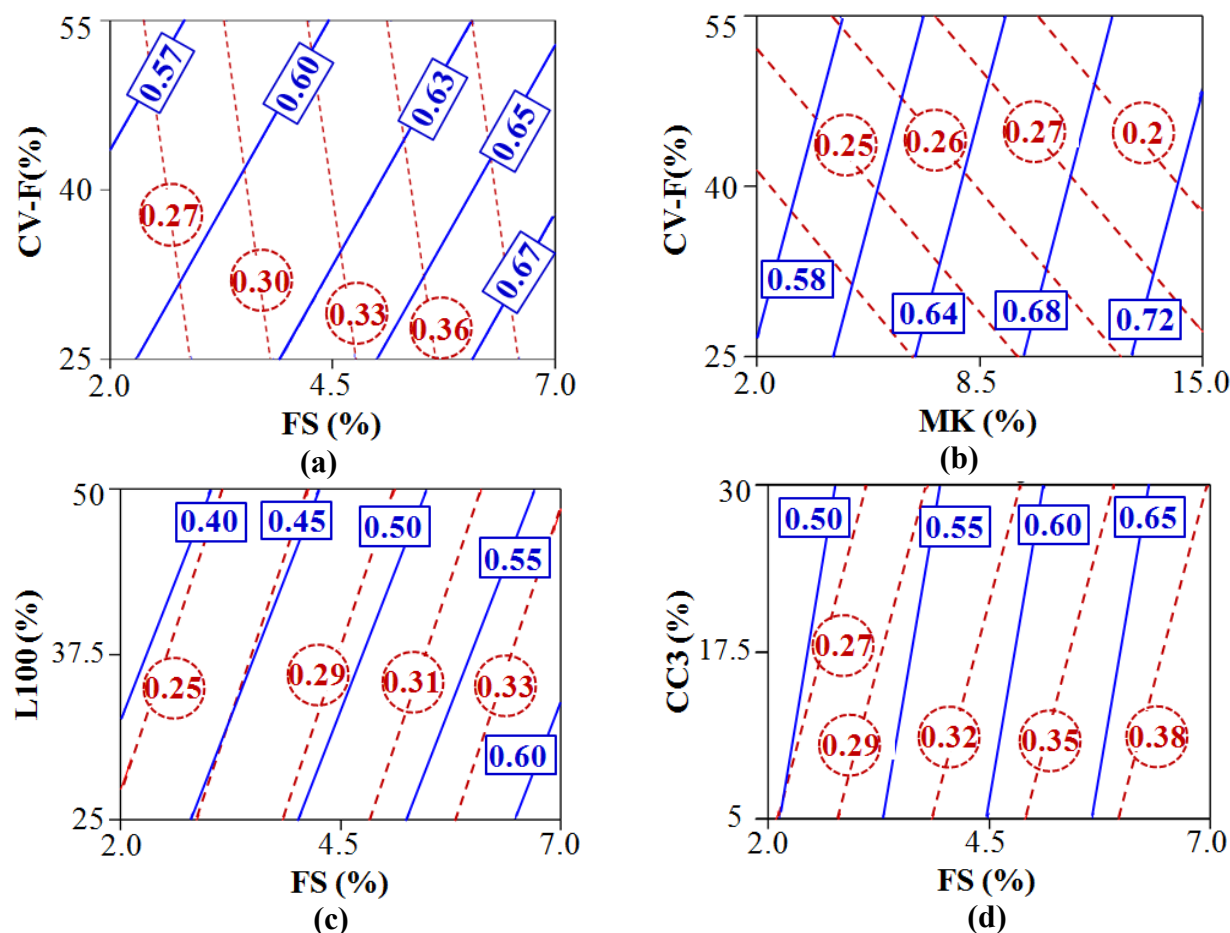


Figure 7.2 Diagramme de contour de la demande en SP des MBE-AP avec les combinaisons ternaires : (a) CV-F – FS (b) CV-F – MK (c) L100 – FS (d) CC3 – FS

Trait plein : MBE-AP avec PNS; trait en pointillés : MBE-AP avec PC (AV1 et AV2 constants)

obtenues en présence de PNS-AV1 sont de 1,5 fois à 2,5 fois plus importantes que celles obtenues en présence de PC-AV2. μ_{pl} des MBE-AP ternaires contenant la combinaison CV-F – FS semble dépendre du type de SP-AV utilisé (figure 7.3-a). En effet, la CV-F semble augmenter

μ_{pl} en présence de PNS-AV1 alors qu'aucun changement significatif n'est noté en présence de PC-AV2. Pour un taux de remplacement de 2% de FS, l'augmentation du pourcentage de la CV-F de 25% à 55% donne une valeur moyenne de μ_{pl} de $1,7 \pm 0,1$ Pa.s avec le couple PC-AV2 alors qu'elle est augmenté de 3,8 à 4,9 Pa.s avec PNS-AV1. Dûe à sa forme sphérique, la FS a toujours tendance à diminuer la viscosité plastique des MBE. Avec 40% de CV-F, l'accroissement du remplacement en FS de 2% à 7% réduit la viscosité de 4,3 à 3,5 Pa.s en présence de PNS-AV1 et de 1,8 Pa.s à 1,4 Pa.s en présence de PC-AV2.

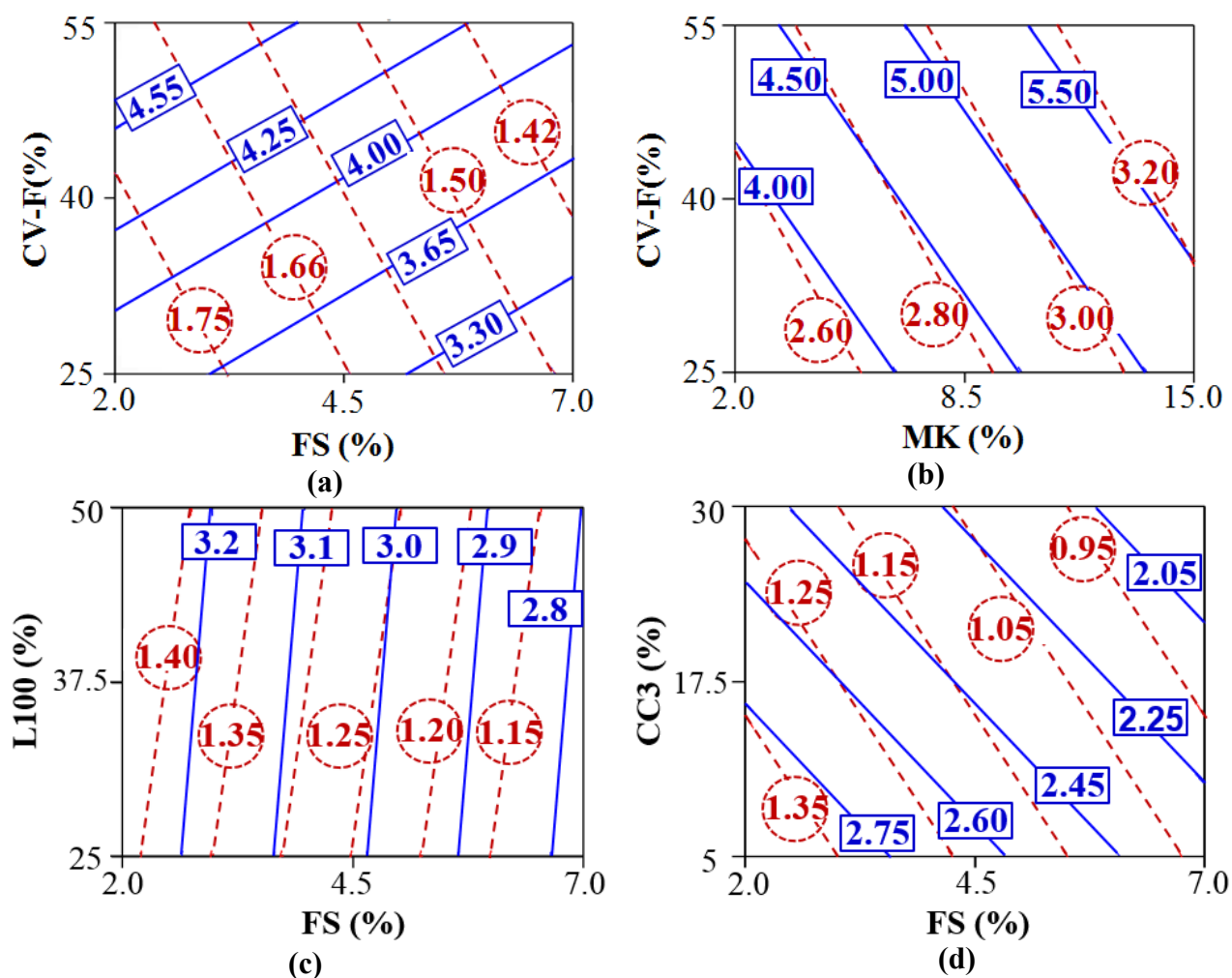


Figure 7.3 Diagramme de contour de la viscosité plastique des MBE-AP avec les combinaisons ternaires (a) CV-F – FS (b) CV-F – MK (c) L100 – FS (d) CC3 – FS
 Trait plein : MBE-AP avec PNS; trait en pointillés : MBE-AP avec PC (AV1 et AV2 constants)

Les viscosités des MBE-AP ternaires les plus élevées sont obtenues par l'utilisation de la CV-F avec le MK et ceci quel que soit le couple SP-AV (figure 7.3-b). En effet, le MK possède un rôle important dans l'augmentation de la μ_{pl} qui est attribué à la grande surface spécifique du MK dont la forme des particules est semi-angulaire ce qui engendre l'augmentation de la friction entre les particules. À 40% de CV-F, l'augmentation de la substitution du ciment par le MK de 2% à 15% a résulté à une augmentation de la viscosité de 3,8 à 5,7 Pa.s en présence de PNS-AV1 et de 2,5 à 3,2 Pa.s en présence de PC-AV2. Tandis que pour 2% de MK, l'augmentation du pourcentage de la CV-F de 25% à 55% a engendré des augmentations de μ_{pl} de 3,4 à 4,3 Pa.s en présence de PNS-AV1 et de 2,4 à 2,7 Pa.s en présence de PC-AV2.

Par ailleurs, des légères réductions dans la μ_{pl} sont notées en combinant le L100 avec la FS. Ces réductions sont causées principalement par la présence de la FS. En effet, pour un taux de remplacement de 50% en L100, l'augmentation du pourcentage de la FS de 2% à 7% a entraîné une diminution de la viscosité de 3,3 à 2,8 Pa.s en présence de PNS-AV1 et de 1,4 à 1,1 Pa.s.

Pour les deux couples SP-AV, les MBE-AP contenant la combinaison du CC3 avec la FS a manifesté des μ_{pl} les plus faibles de toutes les combinaisons ternaires étudiées. À 30% de CC3, le remplacement partiel du ciment par 2% à 7% de FS a diminué la viscosité de 2,5 à 1,9 Pa.s en présence de PNS-AV1 et de 1,2 à 0,83 Pa.s. Il faut noter que la stabilité des MBE-AP contenant cette combinaison ternaire était mise en péril plus spécifiquement en présence de PC-AV2 à cause des faibles viscosités obtenues. En effet, les MBE-AP présentant des viscosités de l'ordre de $1 \pm 0,2$ Pa.s ont manifesté quelques signes d'instabilité sous l'aspect d'une fine couche de ressuage observée lors des essais d'étalement.

7.3.4 Perte de maniabilité des MBE-AP contenant les ciments ternaires

Aucun modèle significatif n'a pu être obtenu pour la rétention de la fluidité, ce qui est normal du fait que l'étalement initial des MBE-AP ternaires est constant et qu'une bonne rétention de la fluidité est notée dans la majorité des mélanges ternaires jusqu'à 60 min du contact eau-ciment. Généralement, des pertes d'étalement comprises entre 0% à 8% sont notées à 60 min. Ces pertes correspondent à des pertes de 0% à 30% au niveau du seuil de cisaillement, ce qui signifie que le

caractère autoplaçant n'a pas été affecté. Cependant, les mélanges de la combinaison CC3 – SF (PNS) ont présenté les plus grandes pertes parmi tous les MBE-AP ternaires pour lesquelles au bout de 60 min du contact eau-ciment, les mélanges ont présenté un caractère semi-fluide. En effet, ces pertes sont comprises entre 8% et 21% pour l'étalement et entre 33% et 140% pour le seuil de cisaillement (tableau D.13).

7.3.5 Effet des ciments ternaires sur le ressuage forcé des MBE-AP

La figure 7.4 illustre les surfaces de contour de l'effet de la combinaison de deux AM sur le ressuage forcé (RF). Ce dernier est exprimé en pourcentage de la quantité d'eau séparée du volume total d'eau présent dans l'échantillon du MBE. Les résultats montrent que d'une part, les MBE-AP de chaque combinaison ternaire en présence de PNS-AV1 ont présenté quasiment la même valeur du pourcentage du RF. Cela signifie que l'augmentation du taux de remplacement des poudres à faible réactivité et à réactivité élevée n'a pas eu un effet notable sur le RF et que le modèle adéquat pour ces quatre combinaisons est la valeur moyenne des pourcentages d'eau ressuée. D'autre part, les MBE-AP ternaires en présence de PC-AV2 ont présenté des pourcentages de RF nettement plus importants que ceux en présence de PNS-AV1. Ce résultat a déjà été noté dans les systèmes binaires où il était attribué à la capacité des AV à retenir l'eau dans la matrice cimentaire, d'autant plus que les MBE-AP en présence de PC-AV2 ont présenté de faibles viscosités plastiques.

D'après les résultats statistiques et en présence de PC-AV2 le pourcentage du RF des MBE-AP contenant les combinaisons ternaires CV-F – FS et L100 – FS dépend exclusivement du taux de remplacement de la poudre à réactivité élevée, c.-à-d. de la FS. Tandis que pour les combinaisons CV-F – MK et CC3 – FS les deux poudres diminuent le taux du RF avec une contribution deux fois plus importante de la poudre à réactivité élevée (MK et FS) grâce à leurs finesse.

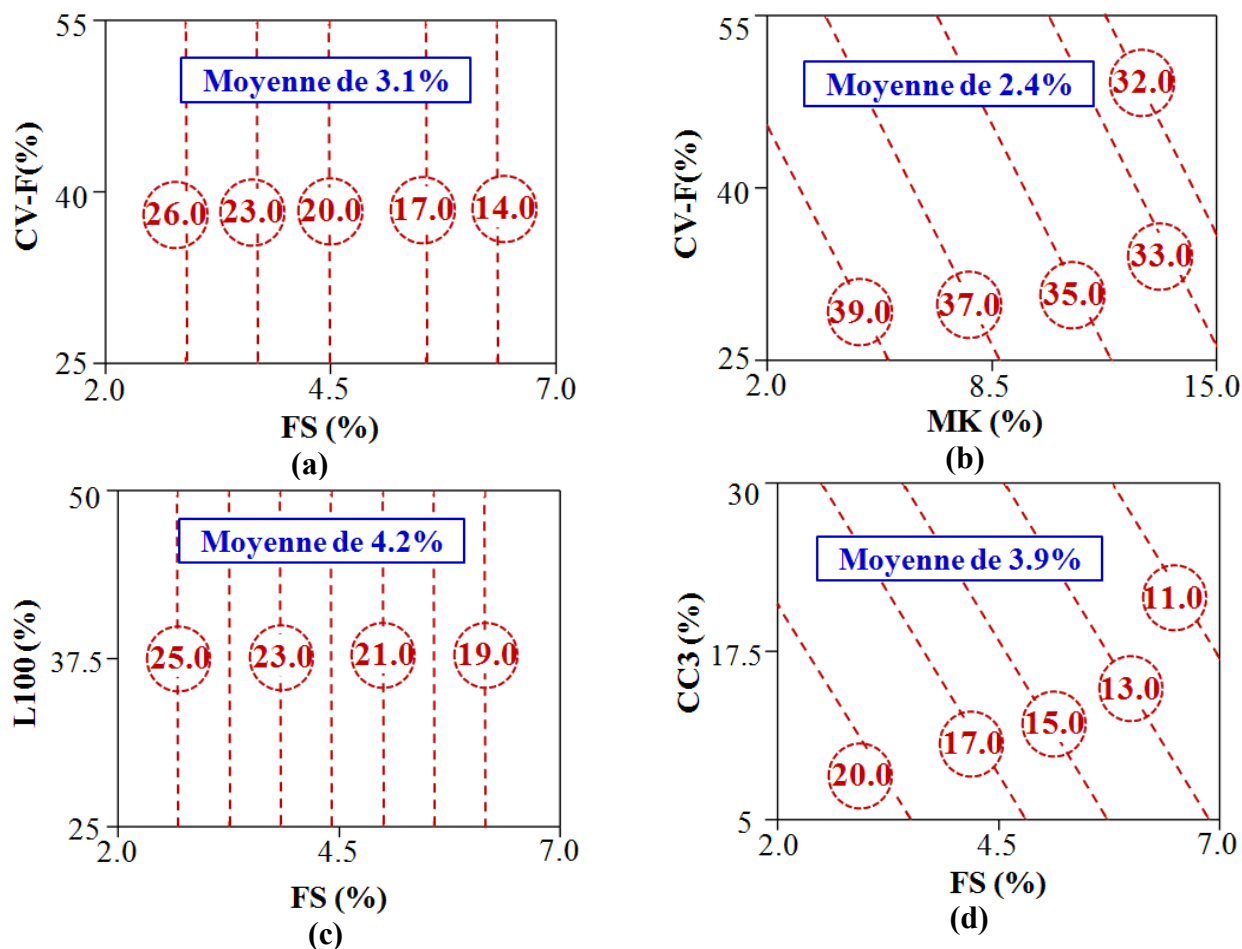


Figure 7.4 Diagramme de contour du ressage forcé des MBE-AP avec les combinaisons ternaires
 (a) CV-F – FS (b) CV-F – MK (c) L100 – FS (d) CC3 – FS
 Trait plein : MBE-AP avec PNS; trait en pointillés : MBE-AP avec PC (AV1 et AV2 constants)

De plus, il est à noter qu'en présence de PC-AV2, la combinaison de la CV-F avec le MK a donné les pourcentages de REF les plus élevés (entre 30% et 40%) parmi toutes les combinaisons ternaires alors que la combinaison du CC3 avec la FS a donné les RF (entre 10% et 24%) les plus faibles. Pourtant les MBE-AP en présence de cette première combinaison ont les viscosités plastiques les plus élevées parmi les quatre combinaisons ternaires (en présence de PC-AV2) alors qu'en présence de la dernière combinaison, les viscosités sont les plus faibles. Ceci est attribué au fait que les particules présentent dans les MBE-AP qui ont des faibles viscosités plastiques peuvent se tasser et se compacter au fond du dispositif du ressage sous l'effet de la

pression appliquée, ce qui freine la percolation de l'eau voire même la bloquer au bout d'un certain temps. Par ailleurs, pour les MBE-AP présentant des viscosités plus élevées, les particules des poudres et du sable vont rester en suspension, ce qui conduit à la continuité du mouvement de l'eau susceptible d'être essorée sous l'effet de la pression appliquée.

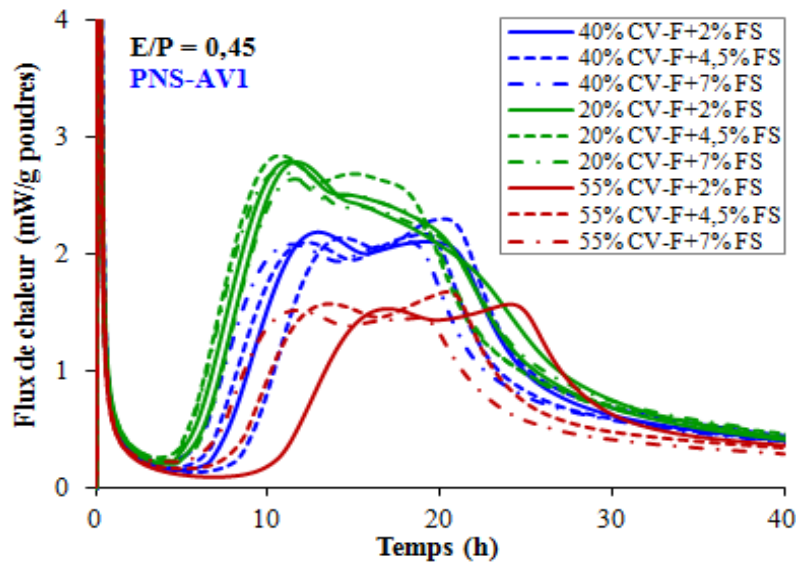
7.3.6 Effet des ciments ternaires sur le dégagement de chaleur des MBE-AP

Le flux de chaleur et la chaleur totale dégagée par l'hydratation des MBE-AP ternaires en présence de PNS-AV1 et de PC-VA2 jusqu'à 40 heures sont représentés sur les figures 7.5 à 7.12. Toutes les courbes du flux thermique ont montré une période dormante, un 2^{ème} pic d'hydratation suivi d'un 3^{ème} pic d'hydratation pour finir par une période de décélération. Il est à noter que la durée de la période dormante ainsi que l'amplitude du 2^{ème} pic d'hydratation dépendent essentiellement du type et du taux de remplacement de la poudre à faible réactivité (CV-F, L100). Les courbes du flux thermique sont groupées selon le taux de remplacement de la poudre à faible réactivité, où plus le taux de remplacement est élevé plus la période dormante est prolongée suivie d'une plus faible intensité du 2^{ème} pic d'hydratation. Ceci est dû au fait que le ciment est remplacé par des poudres moins réactives et dont l'hydratation génère moins de chaleur. À l'exception des courbes des MBE-AP ternaires contenant CC3 – FS où l'augmentation du taux de remplacement de la CC3 de 5% à 30% a raccourci la période dormante de 1,3 h et 2,2 h en présence des couples PNS-AV1 et PC-AV2, respectivement. De la même façon respective, l'amplitude du 2^{ème} pic est diminuée de 18% et de 20%. D'ailleurs, les durées de période dormante de ces combinaisons s'avèrent les plus courtes ($4 \pm 0,5$ h) en comparaison avec les autres systèmes ternaires, sachant que la fin de la période dormante est attribuée à la fin du trait continu de cette dernière. Comme il a été déjà mentionné au chapitre 5, l'hydratation du C_3S est accélérée par la présence de $CaCO_3$ et que les particules fines des fillers peuvent réagir pour former le monocarboaluminate.

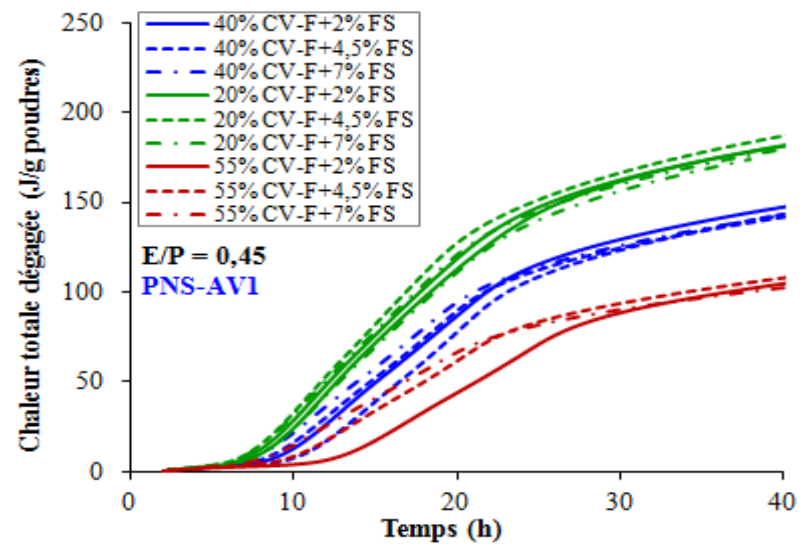
Les MBE-AP contenant des combinaisons de CV-F sont les mélanges qui ont exposé les périodes dormantes les plus prolongées parmi tous les mélanges ternaires et avec les plus faibles intensités du 2^{ème} pic d'hydratation. En effet, pour les mélanges 55% CV-F + 2% FS et 55% CV-F + 2%

MK la durée de la période dormante est prolongée jusqu'à $9 \pm 0,3$ h en présence des deux types SP-AV. Par ailleurs, la présence du L100 semble avoir un impact très favorable sur la diminution de l'intensité du 2^{ème} pic sans pour autant prolonger la durée de la période dormante. Pour un remplacement partiel qui varie de 25% à 50% en L100 et de 2% à 7% en FS, la période dormante dure jusqu'à $5 \pm 0,25$ h et $5 \pm 0,5$ h en présence de PNS-AV1 et PC-AV2, respectivement. Quant au 2^{ème} pic d'hydratation, son intensité passe d'approximativement de 2,90 à 1,75 mW/g poudres pour les deux types SP-AV.

L'effet accélérateur des poudres à réactivité élevée (FS et MK) qui était souligné pour les systèmes binaires (raccourcissement de la période dormante) n'a pas été vraiment noté ici du fait que la demande en SP est ajustée pour atteindre l'étalement souhaitée pour les MBE-AP. Plus le taux de remplacement en FS et MK augmente, plus la demande en SP augmente, ce qui pour effet de prolonger la durée de la période dormante suivie d'une diminution dans l'intensité du 2^{ème} pic. Par ailleurs, le 3^{ème} pic d'hydratation, qui est lié à la transformation de l'ettringite en monosulfoaluminate ainsi qu'à la reprise de l'hydratation du C_3A , semble être affecté par le pourcentage de la FS et du MK. En effet, l'intensité de ce pic dépend principalement du type de la combinaison SP-AV et du taux de remplacement de la poudre à réactivité élevée. En effet, ce pic est d'autant plus apparent avec l'accroissement du remplacement de la FS (2% à 7%) ou du MK (2% à 15%) et son intensité peut même dépasser celle du 2^{ème} pic pour des remplacements maximaux en poudre à faible réactivité et de façon beaucoup plus prononcée en présence de PC-AV2. Dans les MBE-AP contenant 40% CV-F, l'augmentation du pourcentage de la FS de 2% à 7% FS a donné des intensités du 2^{ème} et 3^{ème} pic de 2,18 et 2,13 mW/g à 2,06 et 2,30 mW/g en présence de PNS-AV1, respectivement. Tandis qu'en présence de PC-AV2, les valeurs des deux pics sont de 1,95 et 1,70 mW/g à 1,93 et 3,20 mW/g, de la même manière respective.

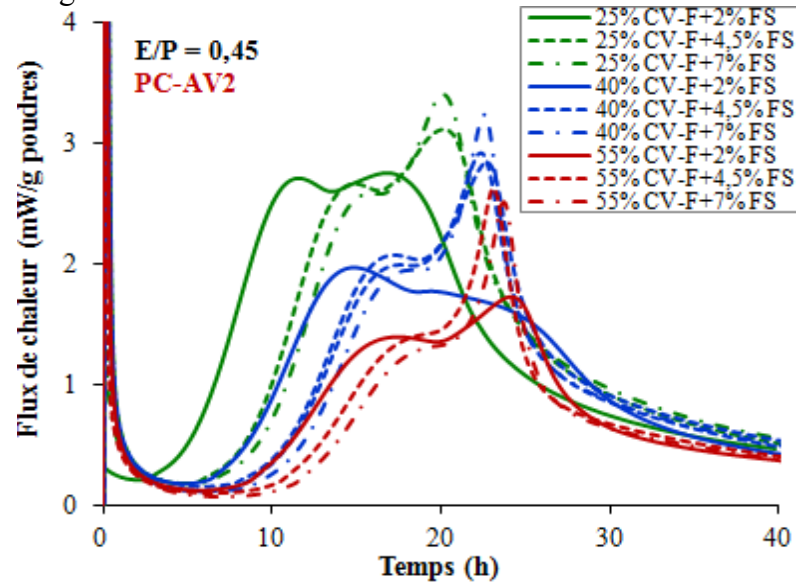


(a) Flux thermique

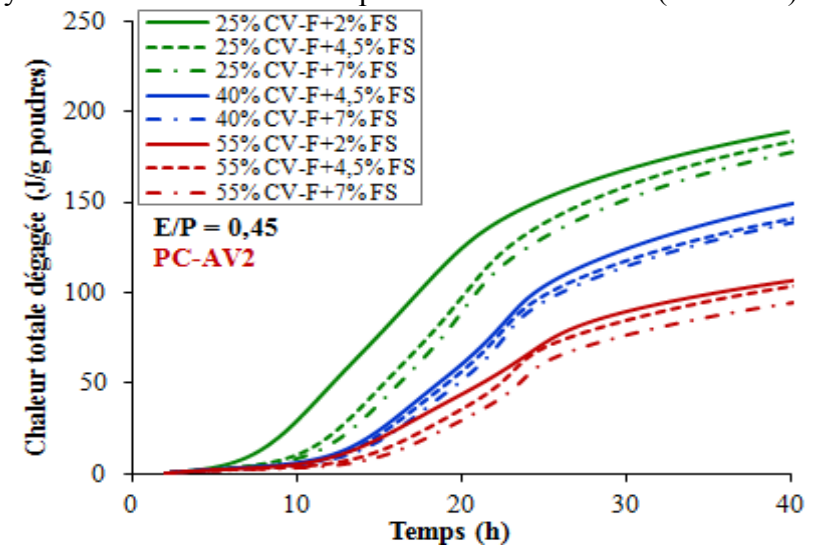


(b) Chaleur totale dégagée

Figure 7.5 Effet de la combinaison CV-F – FS sur la chaleur d’hydratation des MBE-AP en présence de PNS-AV1 (AV1 fixe)

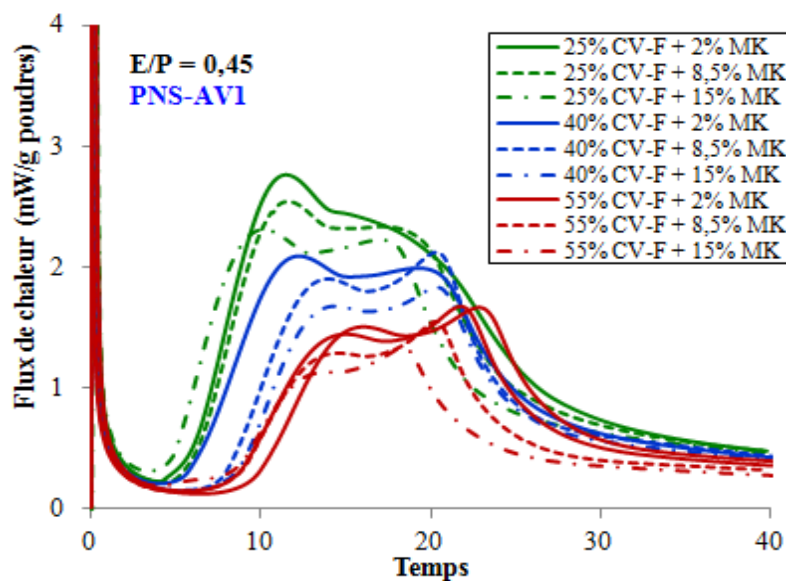


(a) Flux thermique

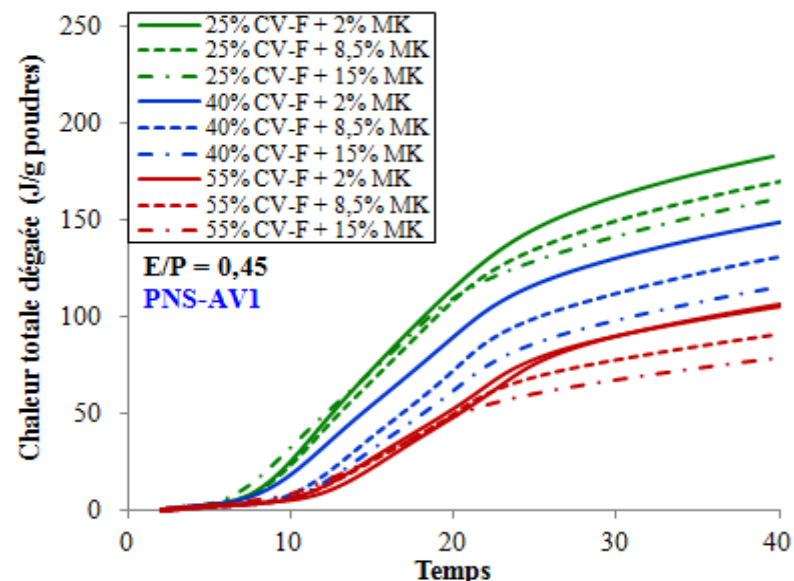


(b) Chaleur totale dégagée

Figure 7.6 Effet de la combinaison CV-F – FS sur la chaleur d’hydratation des MBE-AP en présence de PC-AV2 (AV2 fixe)

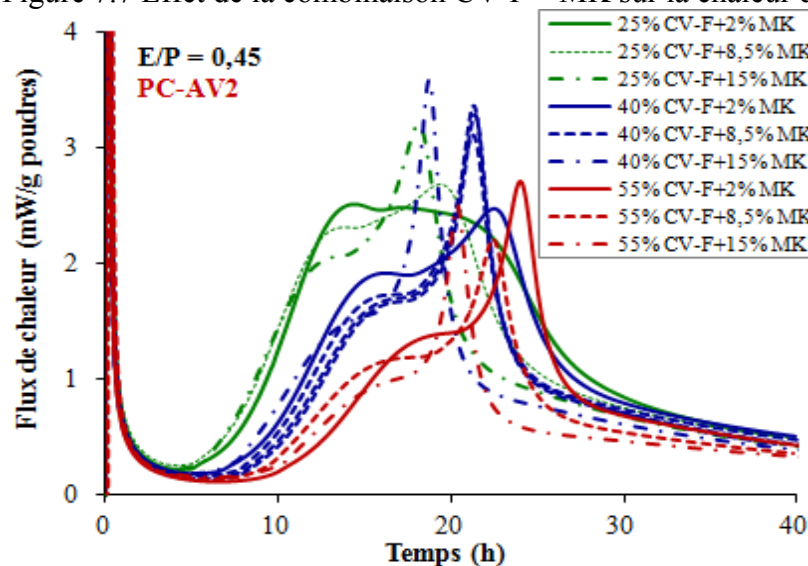


(a) Flux thermique

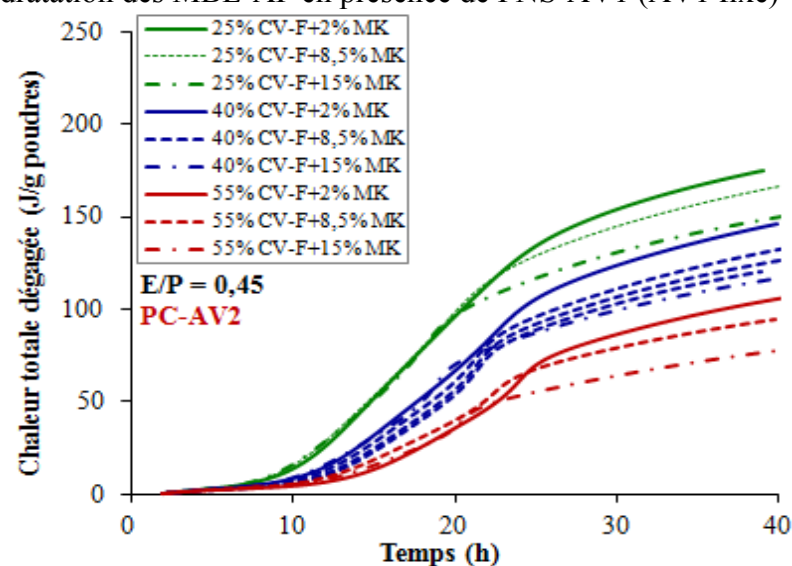


(b) Chaleur totale dégagée

Figure 7.7 Effet de la combinaison CV-F – MK sur la chaleur d'hydratation des MBE-AP en présence de PNS-AV1 (AV1 fixe)

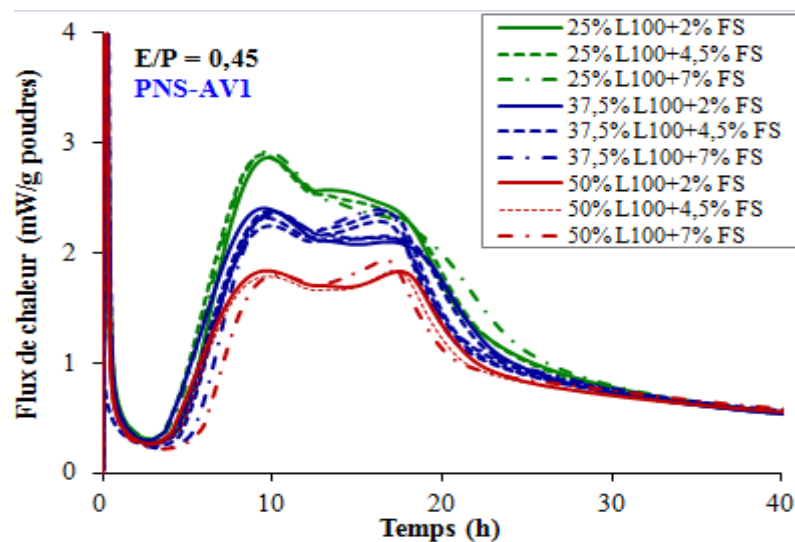


(a) Flux thermique

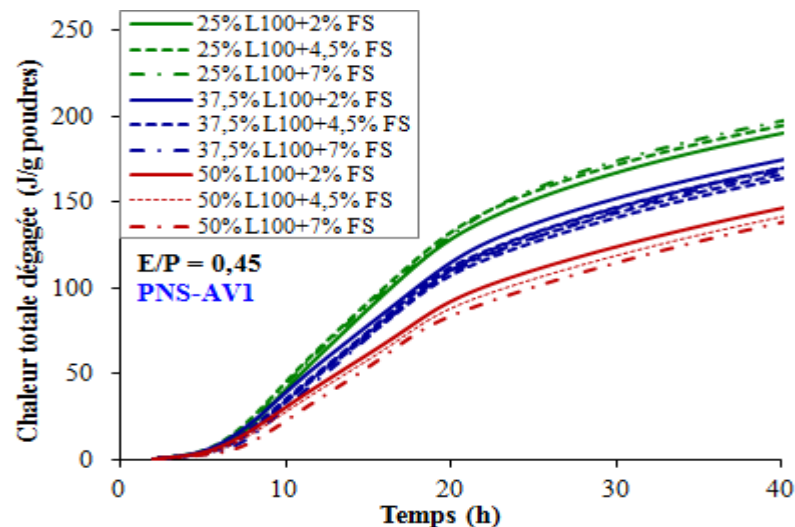


(b) Chaleur totale dégagée

Figure 7.8 Effet de la combinaison CV-F – MK sur la chaleur d'hydratation des MBE-AP en présence de PC-AV2 (AV2 fixe)

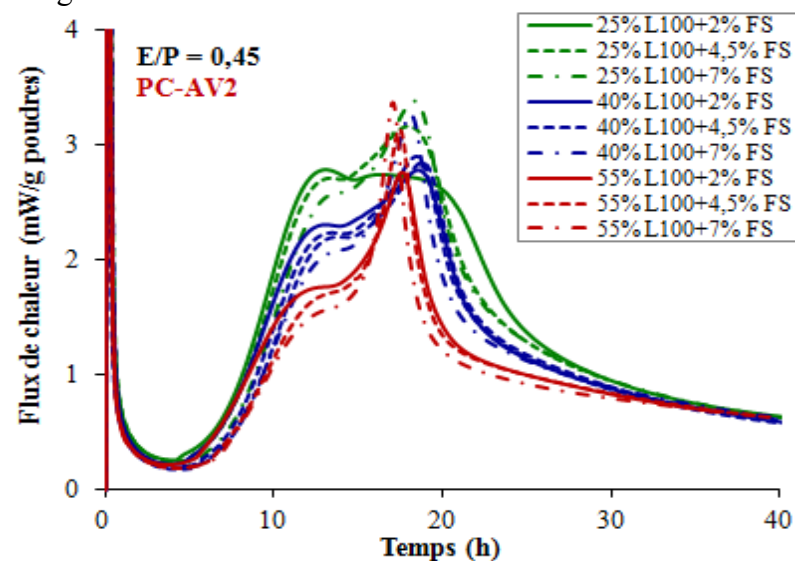


(a) Flux thermique

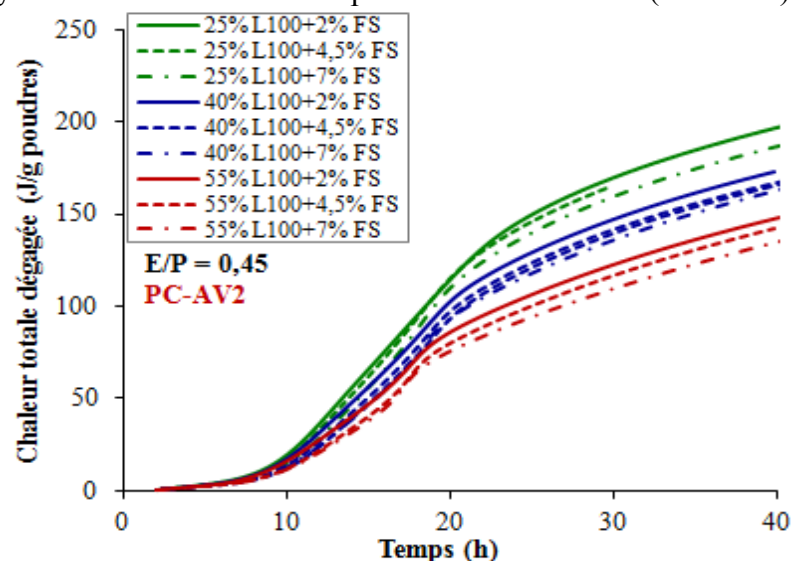


(b) Chaleur totale dégagée

Figure 7.9 Effet de la combinaison L100 – FS sur la chaleur d’hydratation des MBE-AP en présence de PNS-AV1 (AV1 fixe)

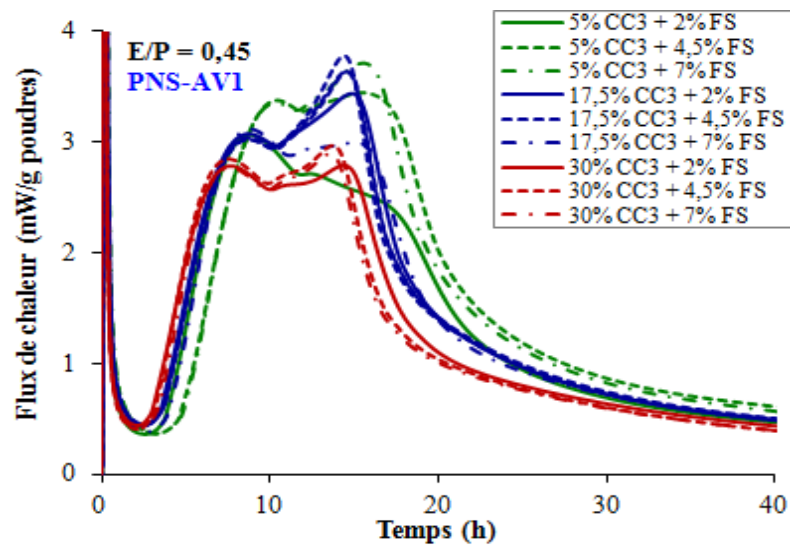


(a) Flux thermique

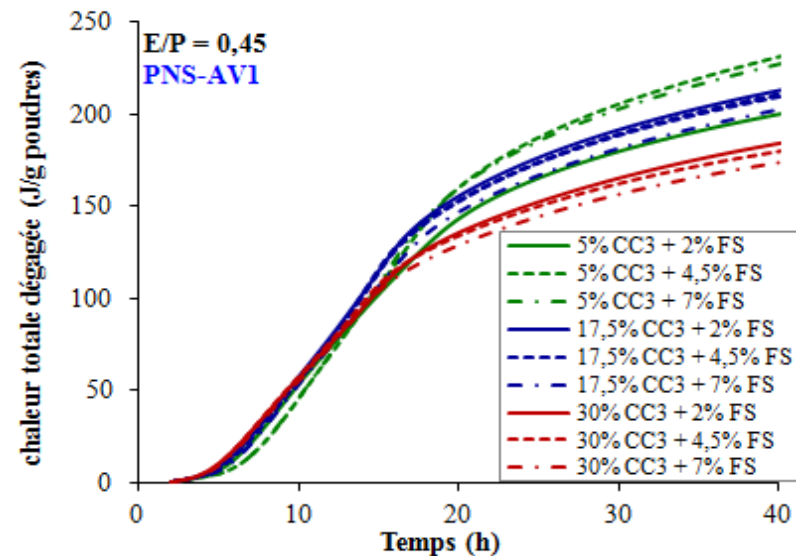


(b) Chaleur totale dégagée

Figure 7.10 Effet de la combinaison L100 – FS sur la chaleur d’hydratation des MBE-AP en présence de PC-AV2 (AV2 fixe)

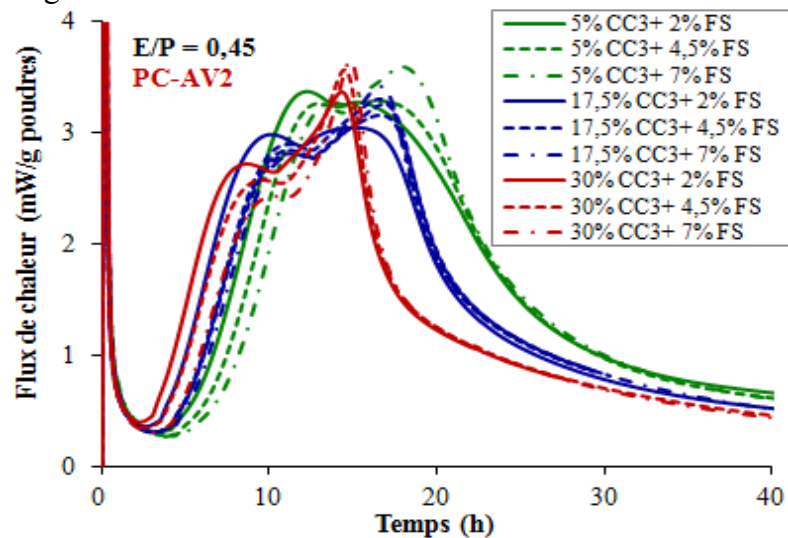


(a) Flux thermique

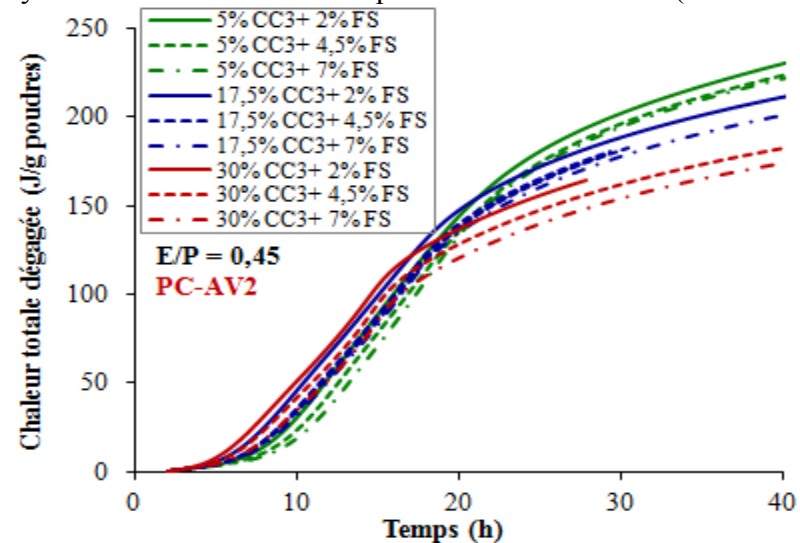


(b) Chaleur totale dégagée

Figure 7.11 Effet de la combinaison CC3 – FS sur la chaleur d’hydratation des MBE-AP en présence de PNS-AV1 (AV1 fixe)



(a) Flux thermique



(b) Chaleur totale dégagée

Figure 7.12 Effet de la combinaison CC3 – FS sur la chaleur d’hydratation des MBE-AP en présence de PC-AV2 (AV2 fixe)

Pour le mélange contenant 50% L100 + 7% FS avec PC-AV2, l'intensité du 3^{ème} pic est quasiment deux fois plus importante que celle du 2^{ème} pic avec des valeurs de 3,37 et 1,73 mW/g poudres, respectivement. Cela peut signifier qu'en plus de la transformation de l'ettringite et de la reprise d'hydratation du C₃A, une quantité suffisante de CH s'est formée pour activer et accélérer l'hydratation du L100 surtout en présence de PC-AV2. Cependant, la chaleur totale générée par ces MBE-AP demeure inférieure à celle où les taux de remplacement des deux poudres sont à leurs minimums. En effet, la chaleur totale générée par les différents MBE-AP ternaires diminue légèrement avec l'augmentation de la substitution en FS ou en MK mais diminue de façon beaucoup plus significative avec l'augmentation de la substitution en CV-F ou L100. À l'exception des mélanges contenant 5% CC3 + 4,5 % FS et 5% CC3 + 7% FS où leur chaleur totale dégagée dépasse celle du mélange 5% CC3 + 2% FS de 15% en présence de PNS-AV1 à cause de l'accélération du processus d'hydratation en présence de PNS-AV1. D'ailleurs, le maximum de chaleur totale dégagée au bout de 40 h du contact eau-ciment de 226 J/g poudre a été pour les mélanges ternaires contenant CC3 – FS en présence de PNS-AV1 ou PC-AV2. Pour le reste des autres combinaisons ternaires, la chaleur totale ne dépasse pas 195 J/g poudres.

7.3.7 Effet des ciments ternaires sur le temps de prise des MBE-AP

Les résultats du temps de prise (TP) des huit combinaisons ternaires sont représentés sur les diagrammes de contour de la figure 7.13. Dans les combinaisons ternaires CV-F – FS, CV-F – MK et CC3 – FS et en présence des deux cas SP-AV, il est noté que d'un côté, l'augmentation du taux de remplacement des poudres à réactivité élevée (FS et MK) a raccourci le TP des MBE-AP. De l'autre côté, l'augmentation du taux de remplacement des poudres à faible réactivité (CV-F et CC3) a prolongé le TP des mélanges ternaires. Cependant, l'effet bénéfique de la FS et du MK est masqué par l'effet de la CV-F et du CC3 qui est deux fois plus important que les premières poudres. Toutefois, pour le cas de CV-F – MK où en présence de PNS-AV1, la contribution du MK est de 4,5 fois plus importante que celle de la CV-F. Malgré cela, les mélanges ternaires de cette dernière combinaison sont ceux qui ont présenté les TP les plus longs parmi tous les MBE-AP ternaires étudiés. Les temps de prise les plus courts sont obtenus en combinant le CC3 avec la FS grâce à leurs effets respectifs dans l'accélération de l'hydratation du ciment. En effet, pour les

deux systèmes CV-F – FS et CC3 – FS, les TP respectifs sont compris entre 5 et 11 h et entre 4,2 et 6,6 h en présence de PNS-AV1 et de 9 à 15,5 h et de 5 à 9,8 h en présence de PC-AV2. Tandis que pour le système CV-F – MK, les TP sont compris entre 11,8 et 17,6 h et entre 9,3 et 13,7 h, en présence de PNS-AV1 et PC-AV2, respectivement. Le TP des MBE-AP de cette dernière combinaison est deux fois plus important que celui des mélanges de la combinaison CC3 – FS qui ont présenté les TP les plus courts. Ceci est lié directement à la demande en SP (PNS) qui est la plus importante en comparaison avec les autres combinaisons. Par ailleurs, les mélanges ternaires de la combinaison L100 – FS ont présenté des TP moyens de $6,2 \pm 0,9$ h et de $9,5 \pm 0,9$ h en présence des couples PNS-AV1 et PC-AV2, respectivement.

7.3.8 Effet des ciments ternaires sur la résistance à la compression des MBE-AP

Les surfaces de contour montrant l'effet des mélanges ternaires sur f'_{c1} , f'_{c28} et f'_{c91} des MBE-AP sont illustrées sur les figures 7.14, 7.15 et 7.16 respectivement. Ces figures montrent que les poudres à faible réactivité ont un effet plus significatif à diminuer f'_{c1} , f'_{c28} et f'_{c91} . Cependant, contrairement aux attentes prévues, les poudres à réactivité élevée ont montré des contributions variables qui dépendent de la combinaison ternaire, du couple SP-AV et surtout de l'âge du test en compression.

Les f'_{c1} obtenues de l'utilisation des systèmes ternaires CV-F – FS et CV-F – MK sont très faibles surtout en présence de PNS-AV1. Pour un taux de remplacement de 40% de CV-F, l'augmentation du pourcentage de la FS de 2% à 7% a entraîné une légère augmentation de f'_{c1} des MBE-AP de 1,9 à 3,6 MPa en présence de PNS-AV1 et une très légère diminution de 5,6 à 4,5 MPa en présence de PC-AV2.

Quasiment la même performance a été notée pour les MBE-AP contenant du MK combiné avec de la CV-F. L'augmentation du taux de remplacement de MK de 2% à 15% avec 40% de CV-F a engendré des f'_{c1} de l'ordre de 1 à 2,3 MPa avec PNS-AV1 et de 5,3 à 4,6 MPa avec PC-AV2. De plus, selon les résultats statistiques, la FS n'a pas montré un effet positif sur les f'_{c1} des mélanges ternaires CC3 – FS et aucun effet pour la combinaison L100 – FS. Néanmoins, les f'_{c1} obtenues

pour ces deux systèmes sont de deux à trois fois plus importantes que celles des systèmes en présence de CV-F. Ceci est dû probablement d'une part, au pourcentage total de remplacement du ciment par les AM qui n'excède pas 37% dans le cas de CC3 – FS (30% de CC3 + 7% FS), alors qu'il est de 70% dans le cas de CV-F – MK (55% CV-F + 15% MK).

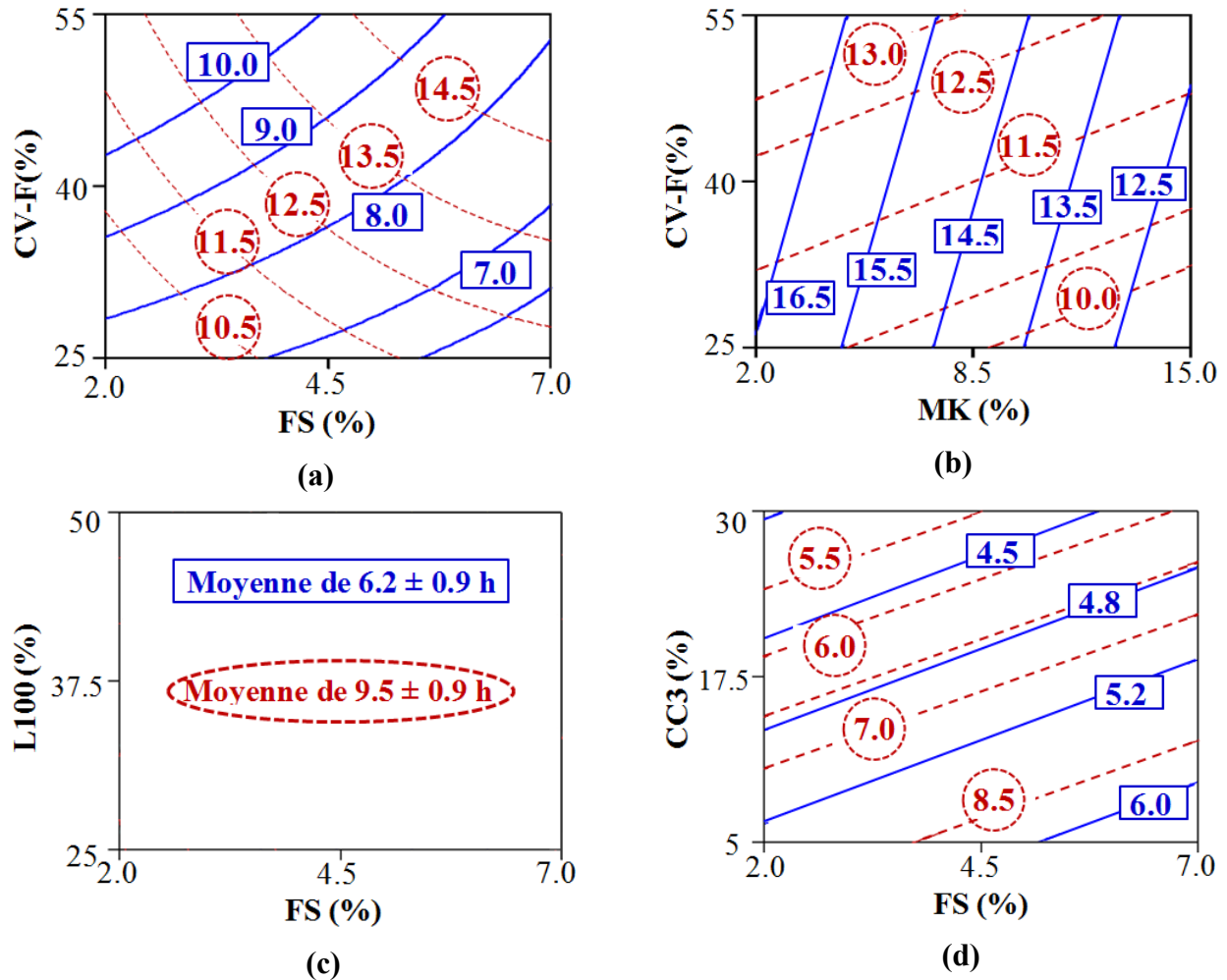
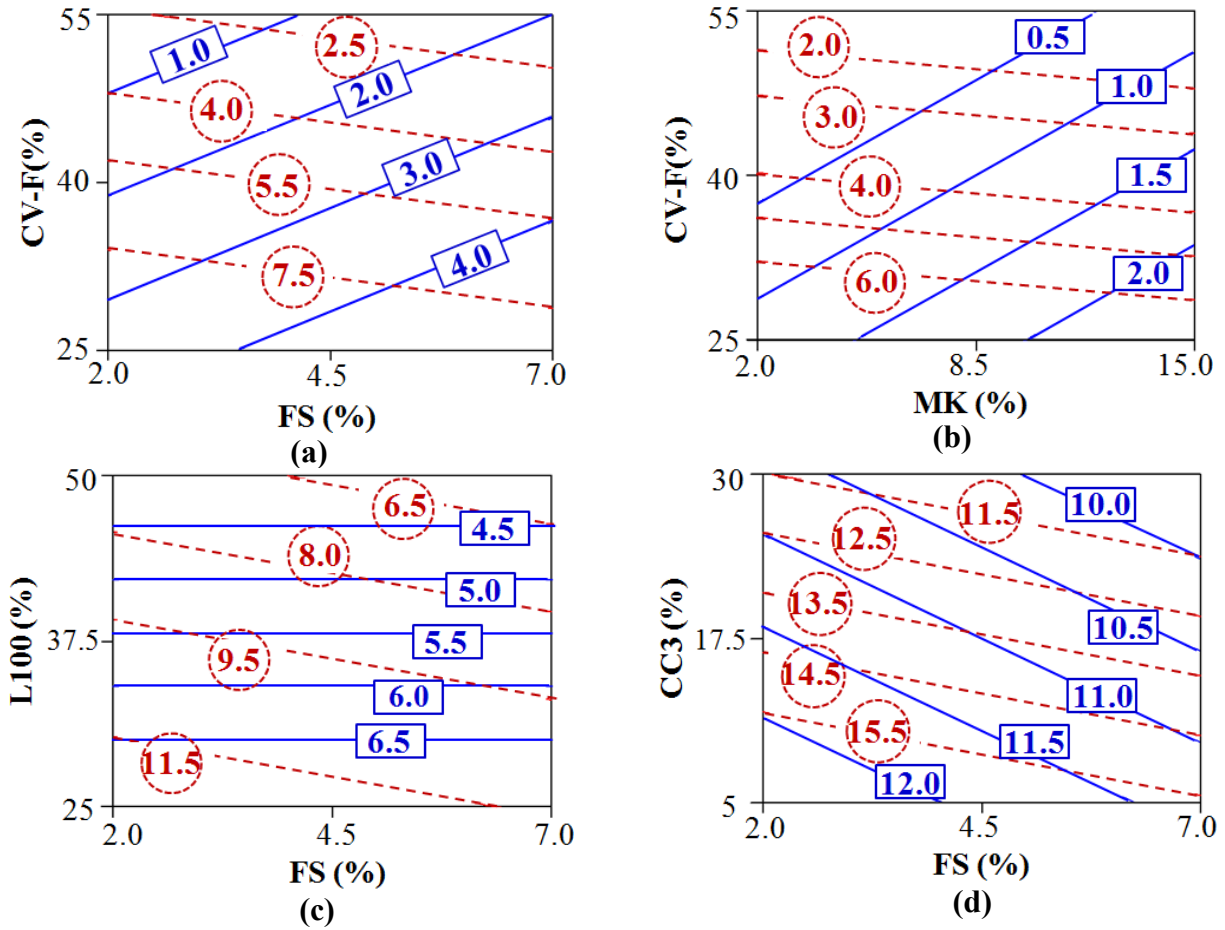


Figure 7.13 Diagramme de contour du temps de prise des MBE-AP avec les combinaisons ternaires (a) CV-F – FS (b) CV-F – MK (c) L100 – FS (d) CC3 – FS

Trait plein : MBE-AP avec PNS; trait en pointillés : MBE-AP avec PC (AV1 et AV2 constants)


 Figure 7.14 Diagramme de contour de f'_{cl} des MBE-AP avec les combinaisons ternaires

(a) CV-F – FS (b) CV-F – MK (c) L100 – FS (d) CC3 – FS

Trait plein : MBE-AP avec PNS; trait en pointillés : MBE-AP avec PC (AV1 et AV2 constants)

D'autre part, la quantité de SP utilisée pour obtenir le caractère autoplaçant est moins importante pour les mélanges ternaires L100 – FS et CC3 – FS en comparaison avec CV-F – FS et CV-F – MK. En effet, plus la demande en SP est importante, plus le temps de prise est prolongé, ce qui affecte les f'_{cl} . Le type de la combinaison SP-AV a aussi joué un rôle non négligeable dans le développement des résistances à jeune âge. En effet, les f'_{cl} des systèmes L100 – FS et CC3 – FS en présence de PC-AV2 sont de 30% à 70% plus importantes qu'en présence de PNS-AV1. De plus, la différence est beaucoup plus large lorsqu'il s'agit des systèmes où les f'_{cl} sont faibles, ce qui est le cas des systèmes CV-F – FS et CV-F – MK où les f'_{cl} sont au minimum trois fois plus

importantes avec PC-AV2 en comparaison avec PNS-AV1. En effet, les f'_{c1} de ces deux dernières combinaisons ternaires sont tellement faibles en présence de PNS-AV1 au point où ces combinaisons sont écartées de la sélection des MBE-AP qui seront validés à l'échelle du béton.

À 28 jours, les diagrammes de contour de la figure 7.15 ne montrent aucun effet synergétique de la combinaison d'une poudre à faible réactivité avec une poudre à réactivité élevée sur les f'_{c28} , mais il s'agit plutôt de la somme des effets des deux poudres individuelles. Toutefois, les f'_{c28} obtenues

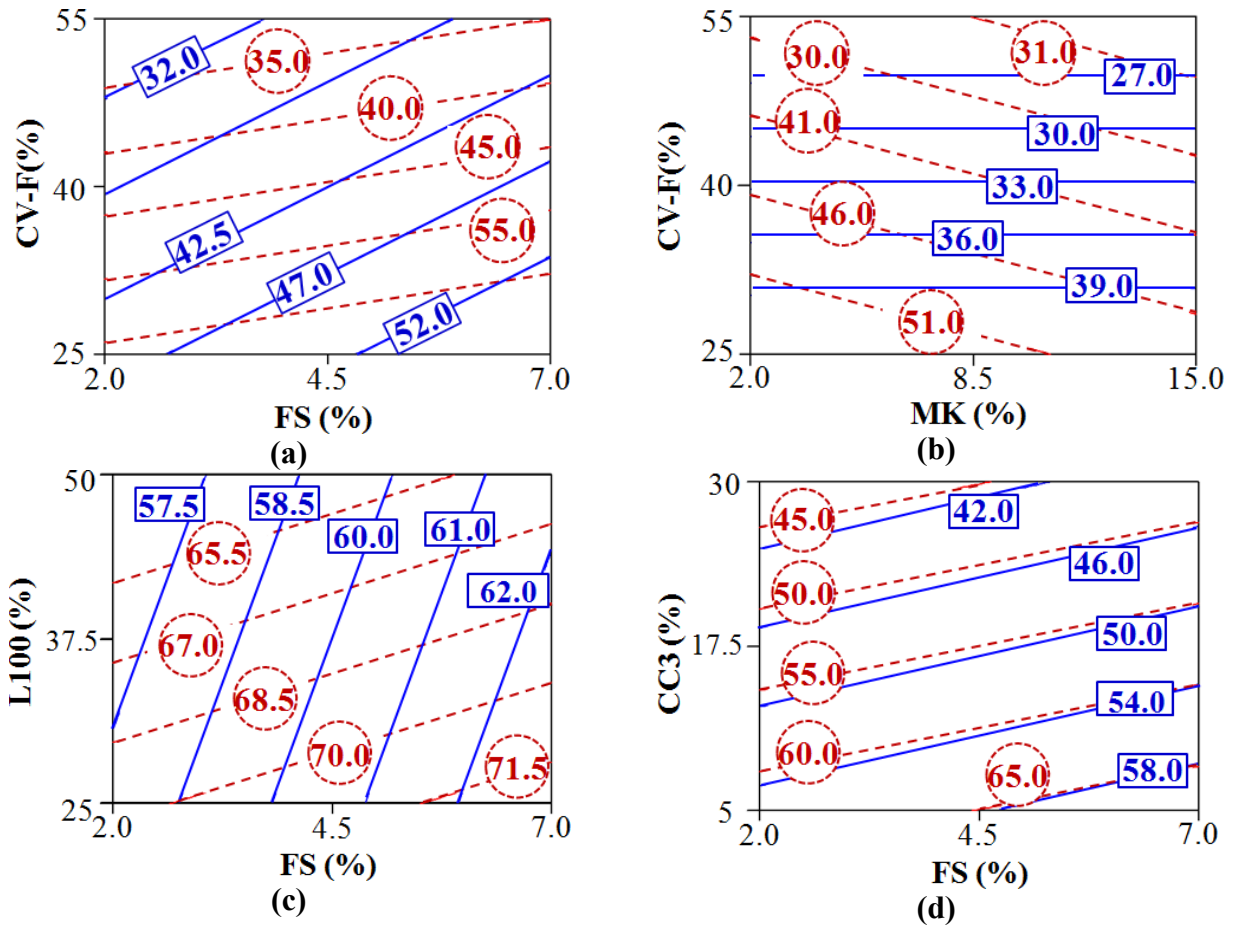


Figure 7.15 Diagramme de contour de f'_{c28} des MBE-AP avec les combinaisons ternaires

(a) CV-F – FS (b) CV-F – MK (c) L100 – FS (d) CC3 – FS

Trait plein : MBE-AP avec PNS; trait en pointillés : MBE-AP avec PC (AV1 et AV2 constants)

sont très élevées pour les systèmes ternaires L100 – FS et CC3 – FS et les sont un peu moins pour les systèmes CV-F – FS et CV-F – MK mais qui demeurent acceptables pour la construction des bâtiments (des valeurs supérieures à 40 MPa à l'échelle du MBE). En effet, d'après les résultats statistiques, une contribution positive de la FS est notée sur les résistances f'_{c28} et f'_{c91} des différents mélanges ternaires. Pour les MBE-AP ternaires L100 – FS, l'augmentation du pourcentage de la FS de 2% à 7% avec un remplacement moyen de 37,5% de L100 donne des f'_{c28} comprises entre 57 et 62 MPa en présence de PNS-AV1 et entre 67 et 69 MPa en présence de PC-AV2. Tandis que pour un pourcentage moyen de 4,5% de FS, l'augmentation du taux de remplacement du L100 de 25% à 50% entraîne une diminution non significatif des f'_{c28} de 60 à 58 MPa avec PNS-AV1 et de 71 à 65 MPa avec PC-AV2. Ces résultats sont très satisfaisants et dépassent les attentes prévues, ce qui peut mener à des résultats intéressants à l'échelle des BAP.

Les MBE-AP contenant la combinaison CC3 – FS ont aussi exposé des f'_{c28} assez importantes comprises entre 38 et 60 MPa avec PNS-AV1 et entre 40 et 68 MPa avec PC-AV2. Le rôle positif de la FS est estimé de 25% à 30% que celui du CC3 qui est à son tour négatif.

Quant au MK, l'augmentation de son taux de remplacement de 2 à 15% dans les MBE-AP ternaires contenant la CV-F n'a, malheureusement, pas manifesté une aussi bonne performance que la FS. Statistiquement, l'augmentation du taux de remplacement de ce dernier en combinaison avec la CV-F n'a montré aucune contribution dans le développement des f'_{c28} et f'_{c91} en présence de PNS-AV1 et une contribution négative qui peut aller jusqu'à 35% en présence de PC-AV2.

À 91 jours, les f'_c de tous les MBE-AP ont continué de se développer. Les MBE-AP contenant le système CC3 – FS ont connu une augmentation de 10 à 15% par rapport à leur f'_{c28} et ceci avec les deux types de SP-AV. Avec la combinaison L100 – FS, les MBE-AP ont présenté des f'_{c91} plus importantes de 25% que des f'_{c28} en présence de PNS-AV1. Grâce à la réaction pouzzolanique des CV-F, le gain de f'_{c91} par rapport à f'_{c28} des MBE-AP contenant la combinaison CV-F – MK est de 15% à 25% en présence de PC-AV2 et de 15% À 40% en présence de PNS-AV1. Lorsque la CV-F est utilisée avec la FS, le gain des résistances est de 64% en présence de PC-AV2.

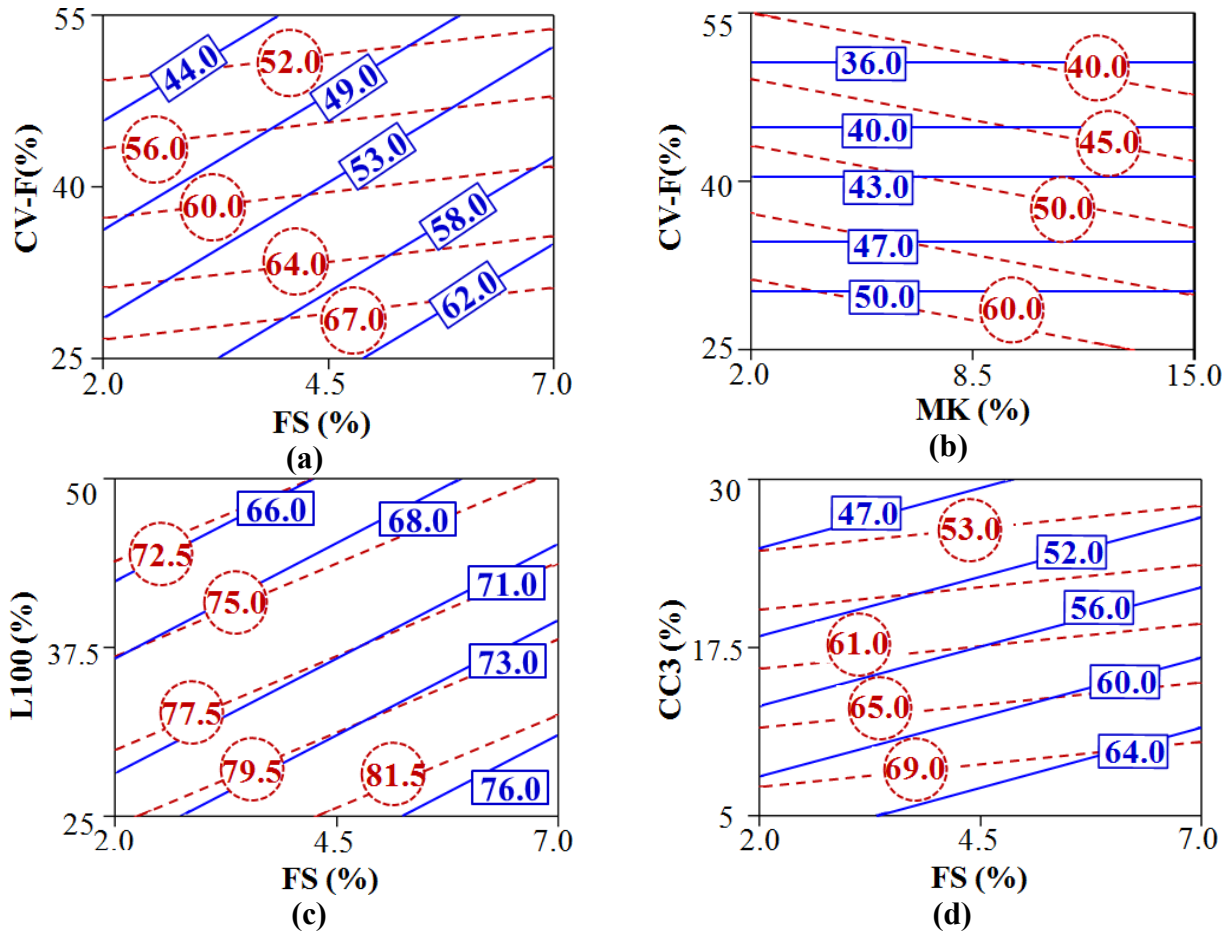


Figure 7.16 Diagramme de contour de f'_{c91} des MBE-AP avec les combinaisons ternaires

(a) CV-F – FS (b) CV-F – MK (c) L100 – FS (d) CC3 – FS

Trait plein : MBE-AP avec PNS; trait en pointillés : MBE-AP avec PC (AV1 et AV2 constants)

7.3.9 Synthèse

Huit combinaisons ternaires ont été sélectionnées pour évaluer leurs performances et les interactions qui peuvent se produire au niveau des propriétés des MBE autoplaçants (MBE-AP) en utilisant la méthode des plans d'expériences. Ces MBE sont fabriqués avec un rapport E/P de 0,45, une quantité totale en poudres de 460 kg/m³, un dosage fixe en AV avec une demande en SP ajustée pour atteindre un caractère autoplaçant pour les bétons destinés à la construction des bâtiments. Les constatations suivantes sont soulignées :

- La plupart des réponses obtenues (demande SP, μ_{pl} , f_c) ont donné des modèles linéaires où l'effet de la combinaison de deux différentes poudres n'est que la somme des effets individuels des poudres.
- Les poudres à faible réactivité comme le laitier à finesse modérée et le filler calcaire fin (L100 et CC3) ont présenté une légère tendance à diminuer la demande en SP, mais cette contribution est complètement masquée par la présence des poudres à réactivité élevée. En effet, à cause de leur surface spécifique, l'accroissement du remplacement des poudres à réactivité élevée (2% à 7% FS ou 2% à 15% MK) a conduit à une tendance à augmenter la demande en PNS de trois à sept fois et de quatre à neuf fois pour le PC que celle des poudres à faible réactivité.
- Les μ_{pl} des MBE-AP obtenues en présence du couple PNS-AV1 sont de 1,5 fois à 2,5 fois plus importantes que celles obtenues en présence du couple PC-AV2.
- La combinaison de la CV-F avec le MK a donné des MBE-AP les plus visqueux parmi tous les MBE-AP ternaires et avec les deux couples SP-AV. Des valeurs de μ_{pl} de 2,4 à 3,4 Pa.s sont obtenues avec PC-AV2 et de 3,4 à 6,2 Pa.s avec PNS-AV1. Par contre, les MBE-AP qui ont présenté les mélanges les moins visqueux de tous les systèmes ternaires sont ceux qui contiennent la combinaison CC3 – FS surtout en présence du couple PC-AV2 où des valeurs de μ_{pl} de 0,8 à 1,4 Pa.s ont été trouvées, d'où une attention particulière est requise vis-à-vis la stabilité lors de la validation de cette dernière combinaison à l'échelle du béton.
- Un bon maintien de la fluidité est noté pour les différentes combinaisons ternaires où le caractère autoplaçant est toujours présent à 60 min du temps de contact eau-poudres. Cependant, certains mélanges contenant la combinaison CC3 – FS ont présenté une consistance semi-fluide en présence de PNS-AV1 (étalement de 220 ± 20 mm).
- Les résultats du flux thermique des MBE-AP ternaires ont montré que l'accroissement de la substitution en poudre à faible réactivité est responsable des changements au niveau de la durée de la période dormante et de l'intensité du 2^{ème} pic d'hydratation. Malgré l'utilisation des poudres à réactivité élevée cela n'a pas contribué à diminuer la durée de la période dormante comme il a été déjà noté dans les ciments binaires. La période dormante la plus prolongée estimée à $9 \pm 0,3$ h a été notée avec les MBE-AP ternaires contenant CV-F – MK et dont la

chaleur totale dégagée ne dépasse pas 175 J/g_{poudres} au bout de 40 h d'hydratation. Tandis que, la période dormante la plus courte a été estimée de $4 \pm 0,5$ h pour les MBE-AP contenant CC3 – FS avec un maximum de chaleur totale dégagée de 226 J/g_{poudres}. Par ailleurs, le type du couple SP-AV et l'augmentation du taux de remplacement des poudres à réactivité élevée ont considérablement affecté l'intensité du 3^{ème} pic d'hydratation. Cette dernière a été estimée jusqu'à deux fois celle du 2^{ème} pic d'hydratation avec la combinaison L100 – FS en présence du couple PC-AV2 mais dont la génération totale de la chaleur au bout de 40 h n'a pas excédé 195 J/g_{poudres}.

- À jeune âge, l'augmentation du pourcentage de substitution poudres à réactivité élevée n'a pas montré un effet positif sur les f'_c des différentes combinaisons.
- Les MBE-AP contenant les combinaisons ternaires CV-F – FS et CV-F – MK ont fourni de très faibles f'_{c1} en présence de PNS AV1, des valeurs de l'ordre de 0,25 à 5 MPa et de 0,4 à 3 MPa, respectivement. Par conséquent, le choix de ces deux combinaisons est éliminé d'une éventuelle validation à l'échelle du BAP.
- L'augmentation du taux de remplacement du MK de 2 à 15% dans les MBE-AP ternaires n'a pas manifesté les attentes qui ont été déjà notées dans les ciments binaires en termes de résistances. Statiquement, des contributions négatives ont été notées sur les résistances à jeune âge et jusqu'à 91 jours.
- Le remplacement partiel du ciment par la FS jusqu'à 7% n'a pas montré une grande contribution à f'_{c1} des MBE-AP ternaires à jeune âge. Cependant, une augmentation des f'_{c28} et f'_{c91} allant jusqu'à 15%, particulièrement en présence du couple PNS-AV1.
- Les f'_{c28} obtenues pour les MBE-AP contenant les systèmes L100 – FS et CC3 – FS sont les plus importantes en comparaison avec les MBE-AP qui contiennent la CV-F. Des valeurs comprises entre 56 à 72 MPa et 43 à 70 MPa sont obtenues respectivement alors qu'elles sont comprises entre 23 à 61 MPa pour les MBE-AP ternaires contenant la CV-F.
- Les MBE-AP ternaires qui ont eu le plus grand gain de f'_c à 91 j par rapport à 28 j sont les mélanges qui contiennent la combinaison L100 – FS en présence de PNS et les mélanges qui

contiennent la CV-F ou un gain allant jusqu'à 64% est noté avec la FS en présence de PC-AV2 grâce à l'importante contribution de la FS.

7.4 EFFET DES CIMENTS TERNAIRES SUR LES PROPRIÉTÉS DES MBE-SF

Après avoir étudié l'effet de certaines combinaisons ternaires sur les propriétés des MBE-AP, il s'agit ici de faire de même pour les MBE-SF. Le choix des combinaisons ternaires ainsi que les taux de remplacement n'est pas forcément pareil vu que les bétons semi-fluides sont destinés aux infrastructures de transport. En effet, six combinaisons ternaires contenant le ciment avec la CV-F ou la CV-C ou L120 et avec soit la FS et le MK qui sont étudiées en présence de PNS en premier lieu puis en présence de PC par la suite, ce qui donne un total de 12 combinaisons ternaires pour les MBE-SF. C'est vrai que le MK a donné une performance moins attendu à l'échelle des développements des f'_c des MBE-AP, mais il a été jugé utile d'étudier son effet sur les propriétés des MBE-SF vu que le rapport E/P pour ces mélanges est de 0,41, ce qui est moins important que celui des MBE-AP. Toutefois, comme il s'agit d'une consistance semi-fluide et que le MK a tendance à augmenter significativement la viscosité plastique, le taux de remplacement maximal a été fixé à 7% par crainte d'obtenir des mélanges trop collants nécessitant beaucoup plus de consolidation. Douze mélanges sont préconisés pour chaque combinaison ternaire dont quatre mélanges sont la répétition du point central (figure 7.1). La demande en SP est déterminée pour avoir un étalement constant de 210 ± 10 mm pour les deux types de SP (PNS et PC). Il faut rappeler que l'utilisation d'un AV ne s'avère pas nécessaire pour cet intervalle de consistance. Les taux de remplacement pour les différentes combinaisons ainsi que les réponses mesurées sont récapitulés sur le tableau 7.16.

7.4.1 Modèles statistiques dérivés

Les modèles statistiques dérivés obtenus par le logiciel "Design-Expert" ainsi que les coefficients de corrélations et leurs valeurs de probabilité pour les différentes réponses sont résumés dans les tableaux 7.17 à 7.21. Les facteurs influant sont déterminés avec une valeur de probabilité. Cette valeur est limitée à 10%. Des valeurs de probabilité "(Prob.)>|t|" inférieures à 0,0500 indiquent

qu'il y a 95% de chance que les termes en question aient un effet significatif sur la réponse. Tandis que, des valeurs supérieures à 0,1000 indiquent que les termes du modèle n'ont pas un effet significatif.

Tableau 7. 18 Valeurs codées et valeurs absolues des variables expérimentales pour les différentes combinaisons des MBE-AP ternaires

Facteur		Niveaux			Combinaisons	Réponses
		Faible (-1)	Central (0)	Élevée (+1)		
Poudre à faible réactivité	CV-F	20	30	40	1. CV-F – FS (PNS et PC)	<ul style="list-style-type: none"> - Demande en SP - μ_{pl} - Chaleur d'hydratation (pour certains MBE-SF) - f'_{c1}, f'_{c28} et f'_{c91}
	CV-C	20	30	40	2. CV-F – MK (PNS et PC)	
	L120	20	35	50	3. CV-C – FS (PNS et PC)	
Poudre à réactivité élevée	FS	2	4,5	7	4. CV-C – MK (PNS et PC)	
	MK	2	4,5	7	5. L120 – FS (PNS et PC)	
					6. L120 – MK (PNS et PC)	

Les modèles obtenus pour les différentes réponses des MBE-AP étaient généralement des modèles linéaires, ce qui signifie que l'effet de la combinaison de deux différentes poudres n'est que la somme de leurs effets individuels. Tandis que pour les MBE-SF, les modèles obtenus (tableaux 7.17 à 7.21) sont partagés entre des modèles linéaires et d'autres d'interaction où une faible interaction entre la poudre à faible réactivité et la poudre à réactivité élevée a commencé à prendre place pour plusieurs réponses. Ceci peut indiquer que la diminution du rapport E/P et de la consistance peuvent jouer un rôle important dans l'augmentation de l'interaction entre les différentes poudres utilisées. Néanmoins, ces effets d'interaction sont faibles et non concluants et sont attribués plus à un ajustement des modèles obtenus. Il faut noter que ce qui était espéré c'est que ces interactions traduisent, par exemple, l'effet favorable de l'amélioration de la compacité, de la granulométrie, etc. résultant de la combinaison du ciment avec deux différentes poudres sur les différentes réponses. Ceci n'était pas vraiment le cas, mais diminuer d'avantage le rapport E/P pourrait donner des résultats plus concluants sur les interactions pouvant résulter de la combinaison de plusieurs poudres sur les propriétés des systèmes cimentaires.

Les différentes réponses des 12 combinaisons ternaires ont présenté des coefficients de corrélation compris entre 0,84 et 0,99 sauf pour le f'_{c91} de la combinaison L120 – MK où les valeurs des

résistances obtenus étaient tellement proches que la corrélation obtenue était faible avec un R^2 de 0,66. Les équations mathématiques, qui permettent de tracer les diagrammes des contours pour chaque réponse en fonction de la combinaison ternaire, sont représentées dans les tableaux 7.22 à 7.26.

Tableau 7.19 Modèles statistiques pour la demande en SP des 12 combinaisons des MBE-SF

Demande en SP								
Combinaison	CV-F – FS (PNS)		CV-F – FS (PC)		CV-F – MK (PNS)		CV-F – MK (PC)	
	$R^2 = 0,99$		$R^2 = 0,95$		$R^2 = 0,96$		$R^2 = 0,96$	
Paramètre	Estimation	Prob.> t	Estimation	Prob.> t	Estimation	Prob.> t	Estimation	Prob.> t
Constante	0,72		0,20		0,71		0,18	
A	-0,0028	0,0199	0,0047	0,1936	-0,027	0,0053	0,00016	0,855
B	0,087	0,0001	0,042	0,0001	0,075	0,0001	0,011	0,0001
AB	0,012	0,0001	-0,012	0,0154	0,042	0,0012	0,0083	0,0001

Tableau 7.17 Modèles statistiques pour la demande en SP des 12 combinaisons des MBE-SF (suite)

Demande en SP								
Combinaison	CV-C – FS (PNS)		CV-C – FS (PC)		CV-C – MK (PNS)		CV-C – MK (PC)	
	$R^2 = 0,98$		$R^2 = 0,87$		$R^2 = 0,88$		$R^2 = 0,90$	
Paramètre	Estimation	Prob.> t	Estimation	Prob.> t	Estimation	Prob.> t	Estimation	Prob.> t
Constante	0,60		0,15		0,53		0,13	
A	-0,037	0,0001	-0,011	0,0025	-0,025	0,0021	-0,0087	0,0003
B	0,11	0,0001	0,020	0,0001	0,046	0,0001	0,013	0,0001
Combinaison	L120 – FS (PNS)		L120 – FS (PC)		L120 – MK (PNS)		L120 – MK (PC)	
	$R^2 = 0,99$		$R^2 = 0,94$		$R^2 = 0,87$		$R^2 = 0,86$	
Paramètre	Estimation	Prob.> t	Estimation	Prob.> t	Estimation	Prob.> t	Estimation	Prob.> t
Constante	0,73		0,17		0,60		0,14	
A	0,020	0,0001	-0,018	0,0001	0,0078	0,1594	-0,013	0,0015
B	0,070	0,0001	0,033	0,0001	0,043	0,0001	0,014	0,0009
AB	-0,020	0,0001	NS	NS	NS	NS	0,014	0,0042

NS : Non significatif

Tableau 7.20 Modèles statistiques pour μ_{pl} des 12 combinaisons des MBE-SF

μ_{pl}								
Combinaison	CV-F – FS (PNS)		CV-F – FS (PC)		CV-F – MK (PNS)		CV-F – MK (PC)	
	$R^2 = 0,98$		$R^2 = 0,98$		$R^2 = 0,98$		$R^2 = 0,99$	
Paramètre	Estimation	Prob.> t	Estimation	Prob.> t	Estimation	Prob.> t	Estimation	Prob.> t
Constante	3,73		4,62		6,61		6,94	
A	0,54	0,0001	0,29	0,0001	0,13	0,0031	-0,042	0,026
B	-0,96	0,0001	-0,70	0,0001	0,70	0,0001	0,950	0,001
AB	NS	NS	NS	NS	0,13	0,0087	-0,560	0,001
Combinaison	CV-C – FS (PNS)		CV-C – FS (PC)		CV-C – MK (PNS)		CV-C – MK (PC)	
	$R^2 = 0,97$		$R^2 = 0,79$		$R^2 = 0,98$		$R^2 = 0,92$	
Paramètre	Estimation	Prob.> t	Estimation	Prob.> t	Estimation	Prob.> t	Estimation	Prob.> t
Constante	3,01		3,66		4,76		5,22	
A	-0,32	0,0001	0,065	0,349	-0,73	0,0001	-0,31	0,0001
B	-0,37	0,0001	-0,33	0,0007	0,46	0,0001	0,46	0,0001
AB	0,21	0,0003	-0,22	0,0210	0,30	0,0004	NS	NS
Combinaison	L120 – FS (PNS)		L120 – FS (PC)		L120 – MK (PNS)		L120 – MK (PC)	
	$R^2 = 0,99$		$R^2 = 0,98$		$R^2 = 0,98$		$R^2 = 0,92$	
Paramètre	Estimation	Prob.> t	Estimation	Prob.> t	Estimation	Prob.> t	Estimation	Prob.> t
Constante	4,41		5,27		8,68		7,30	
A	0,92	0,0001	0,51	0,0001	2,01	0,0001	0,41	0,0003
B	-0,80	0,0001	-1,13	0,0001	0,93	0,0001	0,75	0,0001
AB	-0,63	0,0001	NS	NS	0,81	0,0003	NS	NS

Tableau 7.21 Modèles statistiques pour f'_{c1} des 12 combinaisons des MBE-SF

f'_{c1}								
Combinaison	CV-F – FS (PNS)		CV-F – FS (PC)		CV-F – MK (PNS)		CV-F – MK (PC)	
	$R^2 = 0,99$		$R^2 = 0,98$		$R^2 = 0,96$		$R^2 = 0,99$	
Paramètre	Estimation	Prob.> t	Estimation	Prob.> t	Estimation	Prob.> t	Estimation	Prob.> t
Constante	14,8		16,7		13,4		15,9	
A	-0,55	0,0001	-3,40	0,0001	-3,05	0,0001	-3,66	0,0001
B	-1,53	0,0001	-1,75	0,0001	-0,42	0,0599	-0,73	0,0002
AB	0,04	0,0001	NS	NS	NS	NS	NS	NS
Combinaison	CV-C – FS (PNS)		CV-C – FS (PC)		CV-C – MK (PNS)		CV-C – MK (PC)	
	$R^2 = 0,99$		$R^2 = 0,97$		$R^2 = 0,97$		$R^2 = 0,98$	
Paramètre	Estimation	Prob.> t	Estimation	Prob.> t	Estimation	Prob.> t	Estimation	Prob.> t
Constante	11,8		14,7		12,4		15,38	
A	-2,86	0,0001	-3,18	0,0001	-4,81	0,0001	-4,52	0,0001
B	0,79	0,0001	-0,18	0,3703	-1,90	0,0003	-1,33	0,0001
AB	-0,79	0,0001	-1,17	0,0006	1,52	0,0044	1,17	0,0015
Combinaison	L120 – FS (PNS)		L120 – FS (PC)		L120 – MK (PNS)		L120 – MK (PC)	
	$R^2 = 0,98$		$R^2 = 0,98$		$R^2 = 0,97$		$R^2 = 0,97$	
Paramètre	Estimation	Prob.> t	Estimation	Prob.> t	Estimation	Prob.> t	Estimation	Prob.> t
Constante	14,1		15,6		13,8		15,7	
A	-5,07	0,0001	-4,70	0,0001	-4,37	0,0001	-5,05	0,0001
B	-0,32	0,1085	-1,82	0,0001	-0,23	0,3131	-0,91	0,0105

Tableau 7.22 Modèles statistiques pour f'_{c28} des 12 combinaisons des MBE-SF

f'_{c28}								
Combinaison	CV-F – FS (PNS)		CV-F – FS (PC)		CV-F – MK (PNS)		CV-F – MK (PC)	
	$R^2 = 0,96$		$R^2 = 0,97$		$R^2 = 0,99$		$R^2 = 0,99$	
Paramètre	Estimation	Prob.> t	Estimation	Prob.> t	Estimation	Prob.> t	Estimation	Prob.> t
Constante	61,5		70,0		55,3		56,9	
A	-4,70	0,0001	-3,97	0,0001	-6,41	0,0001	-6,38	0,0001
B	-1,08	0,0048	-1,58	0,0001	2,96	0,0001	0,62	0,0219
AB	NS	NS	+1,17	0,0030	0,96	0,0027	NS	NS
Combinaison	CV-C – FS (PNS)		CV-C – FS (PC)		CV-C – MK (PNS)		CV-C – MK (PC)	
	$R^2 = 0,99$		$R^2 = 0,98$		$R^2 = 0,98$		$R^2 = 0,96$	
Paramètre	Estimation	Prob.> t	Estimation	Prob.> t	Estimation	Prob.> t	Estimation	Prob.> t
Constante	54,8		56,6		56,4		55,45	
A	-6,57	0,0001	-1,93	0,0001	-3,84	0,0001	-3,33	0,0001
B	4,54	0,0001	1,71	0,0001	-1,46	0,0001	-0,87	0,0016
AB	NS	NS	-3,38	0,0001	-2,20	0,0001	NS	NS
Combinaison	L120 – FS (PNS)		L120 – FS (PC)		L120 – MK (PNS)		L120 – MK (PC)	
	$R^2 = 0,99$		$R^2 = 0,98$		$R^2 = 0,99$		$R^2 = 0,96$	
Paramètre	Estimation	Prob.> t	Estimation	Prob.> t	Estimation	Prob.> t	Estimation	Prob.> t
Constante	64,1		69,5		62,7		67,3	
A	-0,19	0,2013	2,28	0,0001	-5,80	0,0001	-0,70	0,0019
B	5,03	0,0001	2,76	0,0001	2,32	0,0001	2,05	0,0001
AB	-6,07	0,0001	-5,52	0,0001	NS	NS	-1,51	0,0001

Tableau 7.23 Modèles statistiques pour f'_{c91} des 12 combinaisons des MBE-SF

f'_{c91}								
Combinaison	CV-F – FS (PNS)		CV-F – FS (PC)		CV-F – MK (PNS)		CV-F – MK (PC)	
	$R^2 = 0,98$		$R^2 = 0,99$		$R^2 = 0,99$		$R^2 = 0,94$	
Paramètre	Estimation	Prob.> t	Estimation	Prob.> t	Estimation	Prob.> t	Estimation	Prob.> t
Constante	65,8		69,2		57,6		68,4	
A	-4,50	0,0001	-3,00	0,0001	-6,87	0,0001	-4,42	0,0001
B	3,75	0,0001	3,33	0,0001	4,29	0,0001	0,51	0,173
Combinaison	CV-C – FS (PNS)		CV-C – FS (PC)		CV-C – MK (PNS)		CV-C – MK (PC)	
	$R^2 = 0,91$		$R^2 = 0,87$		$R^2 = 0,94$		$R^2 = 0,96$	
Paramètre	Estimation	Prob.> t	Estimation	Prob.> t	Estimation	Prob.> t	Estimation	Prob.> t
Constante	69,8		71,2		66,80		72,6	
A	-2,45	0,0001	-2,60	0,0040	-4,14	0,0001	-1,22	0,0001
B	0,92	0,0064	3,62	0,0005	-1,56	0,0012	0,84	0,0004
AB	NS	NS	-3,55	0,0020	NS	NS	-2,33	0,0001
Combinaison	L120 – FS (PNS)		L120 – FS (PC)		L120 – MK (PNS)		L120 – MK (PC)	
	$R^2 = 0,98$		$R^2 = 0,97$		$R^2 = 0,63$		$R^2 = 0,85$	
Paramètre	Estimation	Prob.> t	Estimation	Prob.> t	Estimation	Prob.> t	Estimation	Prob.> t
Constante	83,5		86,7		77,6		79,8	
A	-3,34	0,0001	2,80	0,0001	0,075	0,1841	-1,24	0,0184
B	1,63	0,0001	1,43	0,0001	1,50	0,0022	2,4	0,0004
AB	NS	NS	NS	NS	NS	NS	2,02	0,0041

NS : Non significatif

Tableau 7.24 Représentation mathématique des modèles obtenus pour la demande en SP des huit combinaisons des MBE-SF

Combinaison	Type de SP	Équation finale de la demande en SP en valeurs codées	R ²
CV-F – FS	PNS	$SP (\%) = 0,72 - 0,0028 \times CV-F + 0,087 \times FS + 0,012 \times CV-F \times FS$	0,99
	PC	$SP (\%) = 0,20 + 0,0047 \times CV-F + 0,042 \times FS - 0,012 \times CV-F \times FS$	0,95
CV-F – MK	PNS	$SP (\%) = 0,71 - 0,027 \times CV-F + 0,075 \times MK + 0,042 \times CV-F \times MK$	0,96
	PC	$SP (\%) = 0,18 + 1,65E-4 \times CV-F + 0,011 \times MK + 8,33E-3 \times CV-F \times MK$	0,96
CV-C – FS	PNS	$SP (\%) = 0,60 - 0,037 \times CV-C + 0,11 \times FS$	0,98
	PC	$SP (\%) = 0,15 - 0,011 \times CV-C + 0,020 \times FS$	0,87
CV-C – MK	PNS	$SP (\%) = 0,53 - 0,025 \times CV-C + 0,046 \times MK$	0,88
	PC	$SP (\%) = 0,13 - 0,0087 \times CV-C + 0,013 \times MK$	0,90
L120 – FS	PNS	$SP (\%) = 0,73 + 0,020 \times L120 + 0,070 \times FS - 0,020 \times L120 \times FS$	0,99
	PC	$SP (\%) = 0,17 - 0,018 \times L120 + 0,033 \times FS$	0,94
L120 – MK	PNS	$SP (\%) = 0,60 + 0,0078 \times L120 + 0,043 \times MK$	0,87
	PC	$SP (\%) = 0,14 - 0,013 \times L120 + 0,014 \times MK + 0,014 \times L120 \times MK$	0,86

Tableau 7.25 Représentation mathématique des modèles obtenus pour la μ_{pl} des huit combinaisons des MBE-SF

Combinaison	Type de SP	Équation finale de μ_{pl} en valeurs codées	R^2
CV-F – FS	PNS	$\mu_{pl} \text{ (Pa.s)} = 3,73 + 0,54 \times \text{CV-F} - 0,96 \times \text{FS}$	0,98
	PC	$\mu_{pl} \text{ (Pa.s)} = 4,62 + 0,29 \times \text{CV-F} - 0,70 \times \text{FS}$	0,98
CV-F – MK	PNS	$\mu_{pl} \text{ (Pa.s)} = 6,61 + 0,13 \times \text{CV-F} + 0,70 \times \text{MK} + 0,13 \times \text{CV-F} \times \text{MK}$	0,98
	PC	$\mu_{pl} \text{ (Pa.s)} = 6,94 - 0,042 \times \text{CV-F} + 0,95 \times \text{MK} - 0,56 \times \text{CV-F} \times \text{MK}$	0,99
CV-C – FS	PNS	$\mu_{pl} \text{ (Pa.s)} = 3,01 - 0,32 \times \text{CV-C} - 0,37 \times \text{FS} + 0,21 \times \text{CV-C} \times \text{FS}$	0,97
	PC	$\mu_{pl} \text{ (Pa.s)} = 3,66 + 0,065 \times \text{CV-C} - 0,33 \times \text{FS} - 0,22 \times \text{CV-C} \times \text{FS}$	0,79
CV-C – MK	PNS	$\mu_{pl} \text{ (Pa.s)} = 4,76 - 0,73 \times \text{CV-C} + 0,46 \times \text{MK} + 0,30 \times \text{CV-C} \times \text{MK}$	0,98
	PC	$\mu_{pl} \text{ (Pa.s)} = 5,22 - 0,31 \times \text{CV-C} + 0,46 \times \text{MK}$	0,92
L120 – FS	PNS	$\mu_{pl} \text{ (Pa.s)} = 4,41 + 0,92 \times \text{L120} - 0,80 \times \text{FS} - 0,63 \times \text{L120} \times \text{FS}$	0,99
	PC	$\mu_{pl} \text{ (Pa.s)} = 5,27 + 0,51 \times \text{L120} - 1,13 \times \text{FS}$	0,98
L120 – MK	PNS	$\mu_{pl} \text{ (Pa.s)} = 8,68 + 2,01 \times \text{L120} + 0,93 \times \text{MK} + 0,81 \times \text{L120} \times \text{MK}$	0,98
	PC	$\mu_{pl} \text{ (Pa.s)} = 7,30 + 0,41 \times \text{L120} + 0,75 \times \text{MK}$	0,82

Tableau 7.26 Représentation mathématique des modèles obtenus pour f'_{c1} des huit combinaisons des MBE-SF

Combinaison	Type de SP	Équation finale de f'_{c1} en valeurs codées	R^2
CV-F – FS	PNS	$f'_{c1} \text{ (MPa)} = 14,8 - 3,70 \times \text{CV-F} - 0,83 \times \text{FS} + 1,00 \times \text{CV-F} \times \text{FS}$	0,99
	PC	$f'_{c1} \text{ (MPa)} = 16,7 - 3,40 \times \text{CV-F} - 1,75 \times \text{FS}$	0,98
CV-F – MK	PNS	$f'_{c1} \text{ (MPa)} = 13,4 - 3,05 \times \text{CV-F} - 0,42 \times \text{MK}$	0,96
	PC	$f'_{c1} \text{ (MPa)} = 15,9 - 3,66 \times \text{CV-F} - 0,73 \times \text{MK}$	0,99
CV-C – FS	PNS	$f'_{c1} \text{ (MPa)} = 11,8 - 2,86 \times \text{CV-C} + 0,79 \times \text{FS} - 0,79 \times \text{CV-C} \times \text{FS}$	0,99
	PC	$f'_{c1} \text{ (MPa)} = 14,7 - 3,14 \times \text{CV-C} - 0,18 \times \text{FS} - 1,17 \times \text{CV-C} \times \text{FS}$	0,97
CV-C – MK	PNS	$f'_{c1} \text{ (MPa)} = 12,4 - 4,81 \times \text{CV-C} - 1,9 \times \text{MK} + 1,52 \times \text{CV-C} \times \text{FS}$	0,97
	PC	$f'_{c1} \text{ (MPa)} = 15,4 - 4,52 \times \text{CV-C} - 1,33 \times \text{MK} + 1,17 \times \text{CV-C} \times \text{MK}$	0,98
L120 – FS	PNS	$f'_{c1} \text{ (MPa)} = 14,1 - 5,07 \times \text{L120} - 0,32 \times \text{FS}$	0,98
	PC	$f'_{c1} \text{ (MPa)} = 15,6 - 4,70 \times \text{L120} - 1,82 \times \text{FS}$	0,98
L120 – MK	PNS	$f'_{c1} \text{ (MPa)} = 13,8 - 4,37 \times \text{L120} - 0,23 \times \text{MK}$	0,97
	PC	$f'_{c1} \text{ (MPa)} = 15,7 - 5,05 \times \text{L120} - 0,91 \times \text{MK}$	0,97

Tableau 7.27 Représentation mathématique des modèles obtenus pour f'_{c28} des huit combinaisons des MBE-SF

Combinaison	Type de SP	Équation finale de f'_{c28} en valeurs codées	R^2
CV-F – FS	PNS	$f'_{c28} \text{ (MPa)} = 61,5 - 4,70 \times \text{CV-F} - 1,08 \times \text{FS}$	0,96
	PC	$f'_{c28} \text{ (MPa)} = 70,0 - 3,97 \times \text{CV-F} - 1,58 \times \text{FS} + 1,17 \times \text{CV-F} \times \text{FS}$	0,97
CV-F – MK	PNS	$f'_{c28} \text{ (MPa)} = 55,3 - 6,41 \times \text{CV-F} + 2,96 \times \text{MK} + 0,96 \times \text{CV-F} \times \text{MK}$	0,99
	PC	$f'_{c28} \text{ (MPa)} = 56,9 - 6,38 \times \text{CV-F} + 0,62 \times \text{MK}$	0,99
CV-C – FS	PNS	$f'_{c28} \text{ (MPa)} = 54,8 - 6,57 \times \text{CV-C} + 4,54 \times \text{FS}$	0,99
	PC	$f'_{c28} \text{ (MPa)} = 56,6 - 1,93 \times \text{CV-C} + 1,71 \times \text{FS} - 3,38 \times \text{CV-C} \times \text{FS}$	0,98
CV-C – MK	PNS	$f'_{c28} \text{ (MPa)} = 56,4 - 3,84 \times \text{CV-C} - 1,46 \times \text{MK} - 2,2 \times \text{CV-C} \times \text{MK}$	0,98
	PC	$f'_{c28} \text{ (MPa)} = 55,5 - 3,33 \times \text{CV-C} - 0,87 \times \text{MK}$	0,96

Tableau 7.25 Représentation mathématique des modèles obtenus pour f'_{c28} des huit combinaisons des MBE-SF (suite)

Combinaison	Type de SP	Équation finale de f'_{c28} en valeurs codées	R^2
L120 – FS	PNS	$f'_{c28} \text{ (MPa)} = 64,1 - 0,19 \times L120 + 5,03 \times FS - 6,07 \times L120 \times FS$	0,99
	PC	$f'_{c28} \text{ (MPa)} = 69,5 + 2,28 \times L120 + 2,76 \times FS - 5,52 \times L120 \times FS$	0,98
L120 – MK	PNS	$f'_{c28} \text{ (MPa)} = 62,7 - 5,80 \times L120 + 2,32 \times MK$	0,99
	PC	$f'_{c28} \text{ (MPa)} = 67,3 - 0,70 \times L120 + 2,05 \times MK - 1,51 \times L120 \times MK$	0,96

Tableau 7.28 Représentation mathématique des modèles obtenus pour f'_{c91} des huit combinaisons des MBE-SF

Combinaison	Type de SP	Équation finale de f'_{c91} en valeurs codées	R^2
CV-F – FS	PNS	$f'_{c91} \text{ (MPa)} = 65,8 - 4,5 \times CV-F + 3,75 \times FS$	0,98
	PC	$f'_{c91} \text{ (MPa)} = 69,2 - 3,0 \times CV-F + 3,33 \times FS$	0,99
CV-F – MK	PNS	$f'_{c91} \text{ (MPa)} = 57,6 - 6,87 \times CV-F + 4,29 \times MK$	0,99
	PC	$f'_{c91} \text{ (MPa)} = 68,4 - 4,42 \times CV-F + 0,51 \times MK$	0,94
CV-C – FS	PNS	$f'_{c91} \text{ (MPa)} = 69,8 - 2,45 \times CV-C + 0,92 \times FS$	0,91
	PC	$f'_{c91} \text{ (MPa)} = 71,2 - 2,60 \times CV-C + 3,62 \times FS - 3,55 \times CV-C \times FS$	0,87
CV-C – MK	PNS	$f'_{c91} \text{ (MPa)} = 66,8 - 4,14 \times CV-C - 1,56 \times MK$	0,94
	PC	$f'_{c91} \text{ (MPa)} = 72,6 - 1,22 \times CV-C + 0,84 \times CV-C \times MK - 2,33 \times CV-C \times MK$	0,96
L120 – FS	PNS	$f'_{c91} \text{ (MPa)} = 83,5 - 3,34 \times L120 + 1,63 \times FS$	0,98
	PC	$f'_{c91} \text{ (MPa)} = 86,7 + 2,80 \times L120 + 1,43 \times FS$	0,97
L120 – MK	PNS	$f'_{c91} \text{ (MPa)} = 77,6 + 0,075 \times L120 + 1,50 \times MK$	0,63
	PC	$f'_{c91} \text{ (MPa)} = 79,8 - 1,24 \times L120 + 2,4 \times MK + 2,02 \times L120 \times MK$	0,85

7.4.2 Effet des ciments ternaires sur la demande en SP des MBE-SF

Les diagrammes de contour de la demande en SP, exprimée en extrait sec par rapport à la masse des poudres, des MBE-SF contenant les 12 combinaisons ternaires sont illustrés sur la figure 7.17. Les contours des MBE-SF en présence de PNS sont représentés en trait continu alors que ceux en présence de PC sont représentés en pointillés.

Les résultats montrent que la demande en SP de tous les mélanges ternaires est influencée principalement par l'augmentation du taux de remplacement de la FS et du MK. D'une part, pour les MBE-SF contenant 30% de CV-F, l'augmentation du pourcentage de la FS ou du MK de 2% à 7% a augmenté, de façon respective, la demande en PNS de 0,63% à 0,81% ou de 0,64% à 0,78% et la demande en PC de 0,16% à 0,24% ou 0,17% à 0,19%. Cependant, avec cette même combinaison et pour un pourcentage de 4,5% de FS ou de MK, l'augmentation du taux de la CV-F de 20% à 40% a entraîné des variations non notables des pourcentages en PNS et PC (figure 7.17-a et 7.17-b). En combinant la FS ou le MK avec la CV-C, la demande en SP semble être la moins importante par rapport aux autres systèmes ternaires. L'augmentation du pourcentage de la CV-C de 20% à 40% a une contribution à réduire le pourcentage en SP d'au moins trois fois en comparaison avec la CV-F ou le L120. Le passage de 20% à 40% de CV-C en combinaison avec 4,5% de FS ou de MK réduit respectivement la demande en PNS de 12% ou de 9% et celle de PC de 14% (pour la FS et le MK).

La présence du L120 avec la FS et le MK dans les MBE-SF ternaires s'est caractérisée par un léger effet favorable sur la demande en PC et un effet défavorable beaucoup moins significatif sur celle du PNS. Avec 4,5% de FS (ou de MK), l'accroissement du taux de L120 de 20% à 50% a réduit la demande en PC de 19% (ou de 17%) et a augmenté celle en PNS de 6% (ou de 3%). Par ailleurs, pour un pourcentage fixe en L120 de 35%, la variation du taux de remplacement de la FS (ou du MK) de 2% à 7% a accru la demande en PNS de 1,5 fois (ou 2 fois) et celle en PC de 1,5 fois (ou 1,2 fois).

7.4.3 Effet des ciments ternaires sur la viscosité plastique des MBE-SF

Les surfaces de contour des viscosités plastiques (μ_{pl}) des MBE-SF ternaires sont présentées sur la figure 7.18. Il faut rappeler que μ_{pl} obtenue pour les MBE-SF de référence (100% ciment) est de 7,6 Pa.s en présence de PNS et 7,5 Pa.s en présence de PC. Les résultats montrent que la majorité des combinaisons ternaires ont présenté des μ_{pl} inférieures à celles des MBE-SF de référence, à l'exception des combinaisons CV-F – MK et L120 – MK.

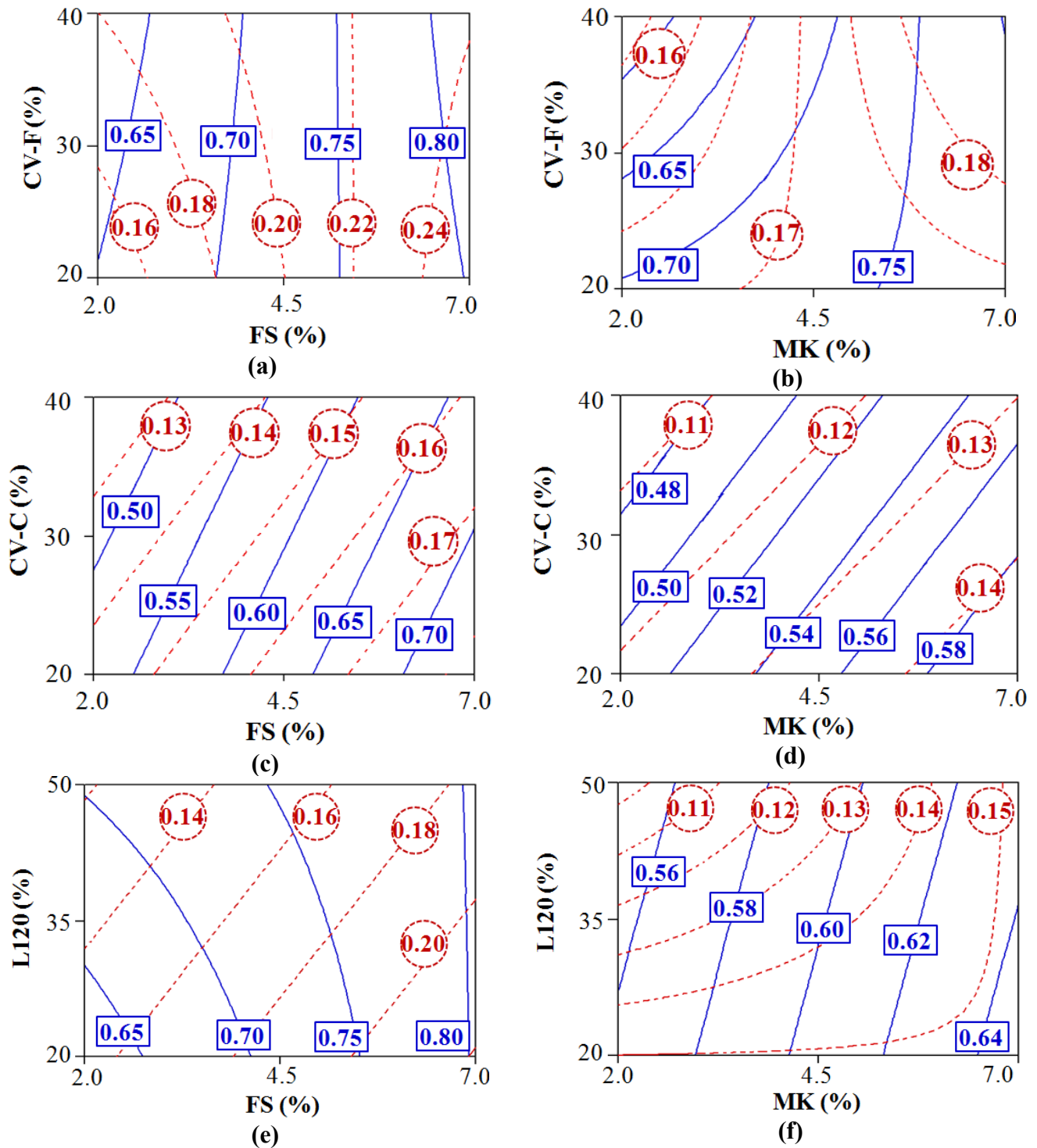


Figure 7.17 Diagramme de contour de la demande en SP des MBE-SF (étalement 210 ± 10 mm) avec les combinaisons ternaires: (a) CV-F – FS (b) CV-F – MK (c) CV-C – FS (d) CV-C – MK (e) L120 – FS (f) L120 – MK (trait plein : MBE-SF avec PNS; trait en pointillés : MBE-SF avec PC)

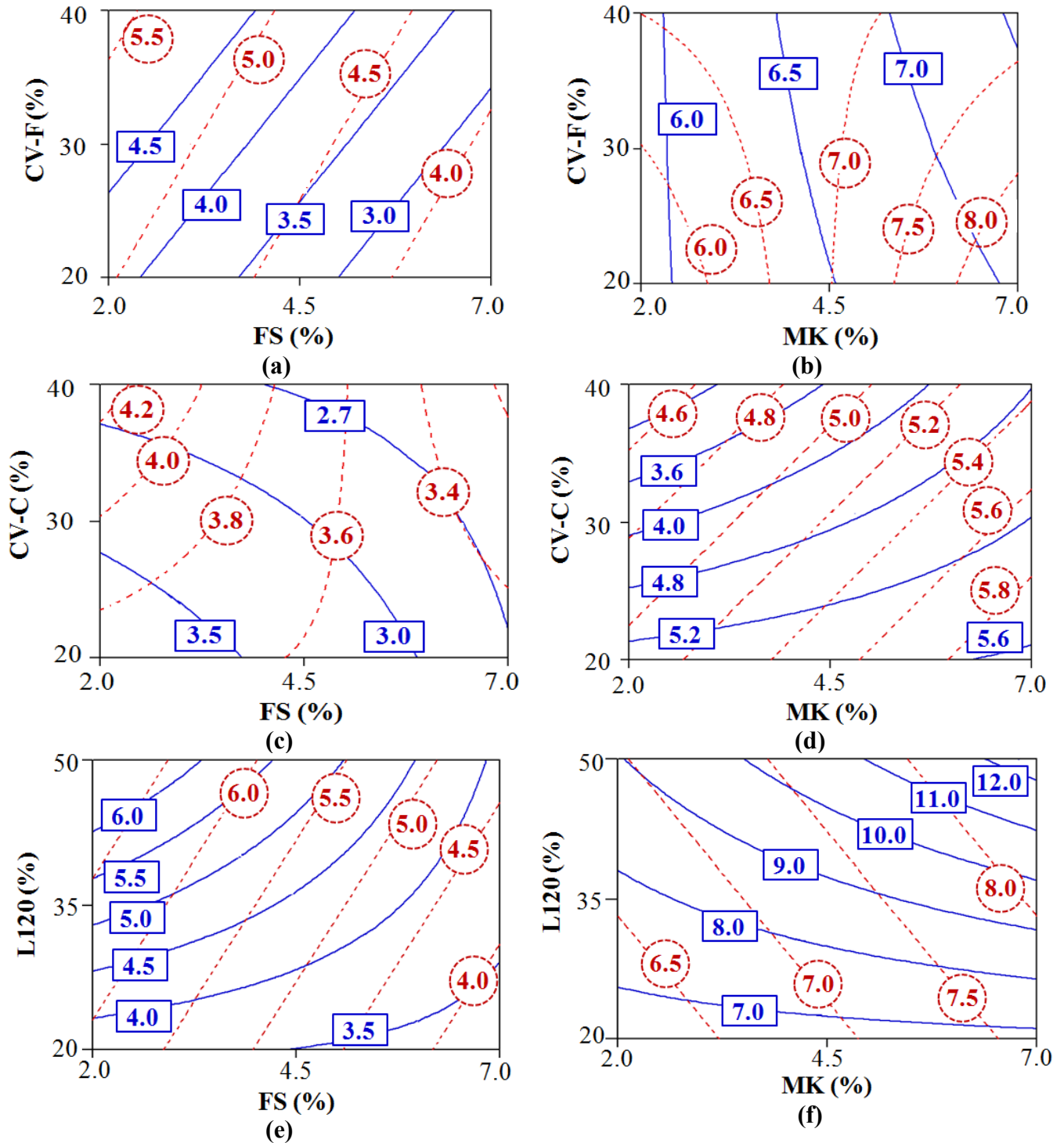


Figure 7.18 Diagramme de contour de la viscosité plastique des MBE-SF (étalement 210 ± 10 mm) avec les combinaisons ternaires: (a) CV-F – FS (b) CV-F – MK (c) CV-C – FS (d) CV-C – MK (e) L120 – FS (f) L120 – MK (trait plein : MBE-SF avec PNS; trait en pointillés : MBE-SF avec PC)

Comme il a été déjà noté dans les mélanges contenant du MK, l'augmentation du taux de ce dernier est le facteur dominant qui accroît la μ_{pl} des MBE. De plus, la combinaison du MK avec le L120 a donné des μ_{pl} deux fois plus importante qu'en le combinant avec CV-F ou CV-C et jusqu'à trois fois plus importante en comparaison avec les mélanges ternaires contenant de la FS. En effet, l'accroissement du taux de remplacement en MK de 2% à 7% a fait varier μ_{pl} des MBE-SF contenant 35% de L120 de 7,8 à 10 Pa.s en présence de PNS et de 6,5 à 8,1 Pa.s en présence de PC.

Il faut mentionner qu'avec une μ_{pl} de 10 Pa.s, les mélanges sont très visqueux et collants qui peuvent nécessiter une augmentation dans la fluidité ou une augmentation dans l'énergie de consolidation pour une bonne mise en place. Par ailleurs, avec ces mêmes MBE-SF mais en remplaçant le MK par la FS, les μ_{pl} tendent à baisser sous l'effet de la FS ce qui donne des variations de la μ_{pl} de 5,2 à 3,6 Pa.s en présence de PNS et de 6,4 à 4,1 Pa.s en présence de PC.

Les MBE-SF ternaires qui ont présenté les plus faibles μ_{pl} sont ceux qui contiennent la CV-C avec la FS. Les MBE-SF fluidifiés par le PNS et contenant 4,5% de FS (ou de MK) avec un remplacement de la CV-C qui varie de 20% à 40% ont présenté des μ_{pl} qui varient de 3,3 à 2,7 Pa.s (ou de 4,0 à 5,5 Pa.s avec 4,5% de MK). Cependant, ceux qui sont fluidifiés par le PC ont présenté une valeur moyenne de la viscosité de 3,7 Pa.s (ou des valeurs variant de 5,5 à 4,9 Pa.s avec 4,5% de MK). Ce domaine de viscosité (3,0 à 6,0 Pa.s) semble être intéressant pour une validation à l'échelle du béton vu que les MBE possèdent une consistance semi-fluide, ce qui peut être avantageux pour la mise en place du béton.

Les combinaisons ternaires contenant de la CV-F ont présenté des μ_{pl} parfois proches à celles des mélanges des MBE-SF de référence. Ceci a été noté avec les MBE contenant 4,5% de MK et un pourcentage de la CV-F variant de 20% à 40% qui ont donné des μ_{pl} d'ordre de 6,7 Pa.s en présence de PNS et de 7,0 Pa.s en présence de PC. Tandis que pour les mélanges contenant 30% de CV-F, la variation du pourcentage de la FS de 2% à 7% a diminué μ_{pl} de 4,7 à 2,8 Pa.s et de 5,3 à 3,9 Pa.s en présence de PNS et PC, respectivement. Ces fourchettes de viscosité semblent aussi intéressantes pour une validation à l'échelle du béton. Cela dit qu'il s'avère plus judicieux de

choisir un mélange de chaque combinaison ternaire pour balayer différentes viscosités afin de tester leurs performances à l'échelle du béton. Ceci sera traité en détail dans le chapitre 8.

7.4.4 Effet des ciments ternaires sur le dégagement de chaleur des MBE-SF

Les résultats du flux de chaleur et de la chaleur totale générée par tous les MBE-SF ternaires, CV-F (FS/MK), CV-C (FS/MK) et L120 (FS/MK) avec les deux types de SP, sont représentés dans les figures 7.19 à 7.30. Dans chaque figure, les résultats concernent les points de remplacement minimaux et maximaux correspondant en valeurs codées à (-1, -1), (-1, 1), (1, -1) et (1, 1) du plan d'expérience.

Les résultats montrent clairement que la durée de la période dormante est très peu affectée par le type et le taux de remplacement des deux poudres. Tous les MBE-SF ternaires ont présenté des périodes dormantes de l'ordre de $3,7 \pm 0,7$ h, ce qui n'est pas un écart très important. En revanche, le pic d'hydratation ainsi que la chaleur totale dégagée par les MBE-SF ternaires s'avèrent qu'ils dépendent exclusivement du taux de remplacement des poudres à faible réactivité. Évidemment, les mélanges contenant les taux de remplacement maximaux ont dégagé moins de chaleur avec des intensités du pic d'hydratation plus faibles par rapport à ceux contenant des taux de remplacement minimaux. De plus, les diminutions dans l'intensité du flux thermique et dans la chaleur totale dépendent très faiblement des types des poudres et du SP utilisés (tableau 7.27). Par exemple, l'intensité du pic et la chaleur totale dégagée à 40 h d'hydratation des mélanges 20% CV-F + 7% FS et 20% CV-C + 7% MK sont, respectivement, de 3,30 et 3,09 mW/g_{poudres} et 207 et 201 J/g_{poudres} avec le PNS et de 3,24 et 3,03 mW/g_{poudres} et de 205 et 203 mW/g_{poudres} avec le PC. Ceci est bien exposé dans les figures 7.31-a et 7.31-b où il apparaît clairement qu'il y a une tendance linéaire entre le taux total de remplacement en poudres et l'intensité du pic d'hydratation ou la chaleur totale générée, indépendamment du type des poudres ou encore le type de SP.

Le 3^{ème} pic d'hydratation, lié à la transformation de l'ettringite et à la reprise de l'hydratation du C₃A, est influencé par le taux de remplacement, le type de la poudre à faible réactivité ainsi que le SP utilisé. Pour les MBE-SF contenant la CV-F (ou CV-C) combinée avec la FS (ou le MK), le 3^{ème} pic d'hydratation est plus apparent lorsque les taux de remplacement sont en leur maximum

mais dont le temps d'apparition est retardé. Généralement, pour des taux de remplacement minimaux, le 3^{ème} pic apparaît sous forme d'une légère bosse autour de $16 \pm 0,3$ h, alors que pour des taux de remplacement maximaux son apparition se produit à $19 \pm 0,3$ h sous forme d'une bosse beaucoup plus prononcée. Par ailleurs, les mélanges où le L120 est combiné avec FS (ou MK) et à des taux de remplacement maximaux, l'intensité du 3^{ème} pic d'hydratation peut même dépasser celle du 2^{ème} pic et d'une façon plus significative en présence du PNS sans retarder le temps de son apparition. En effet, pour les mélanges 50% L120 + 7% FS et 50% L120 + 7% MK, l'intensité du 3^{ème} pic est plus importante par rapport au 2^{ème} pic d'hydratation de 9% et 20%, respectivement, en présence de PNS. Par contre, cette différence pour les deux mélanges susmentionnés ne dépasse pas 3% en présence du PC.

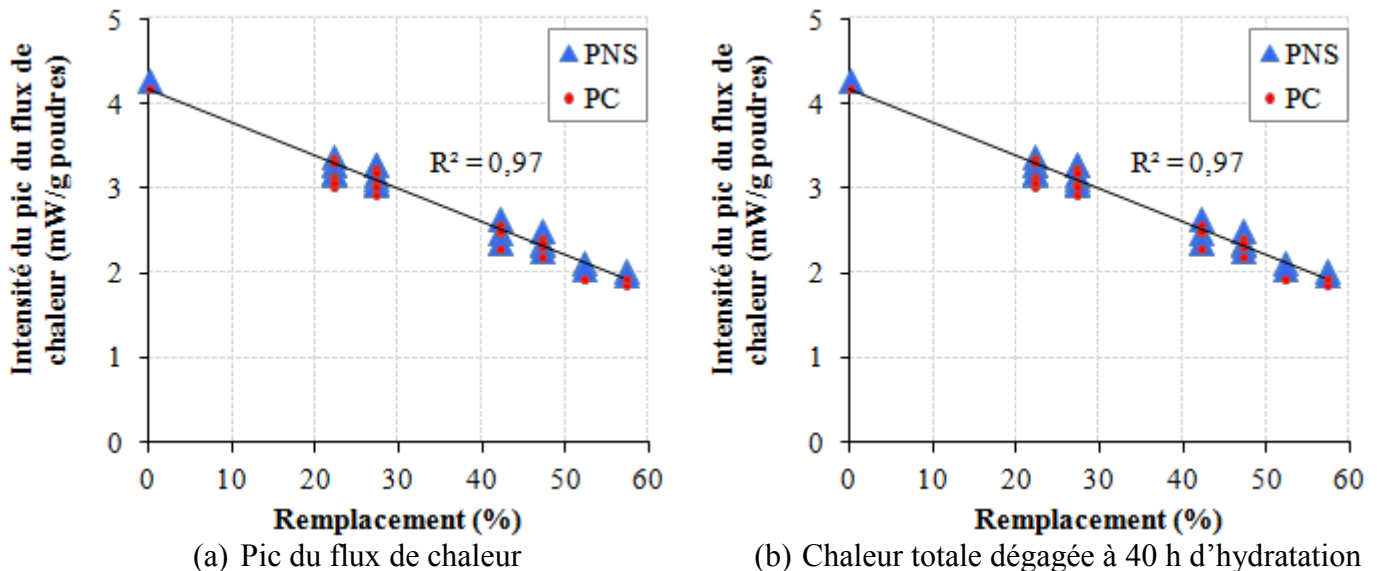
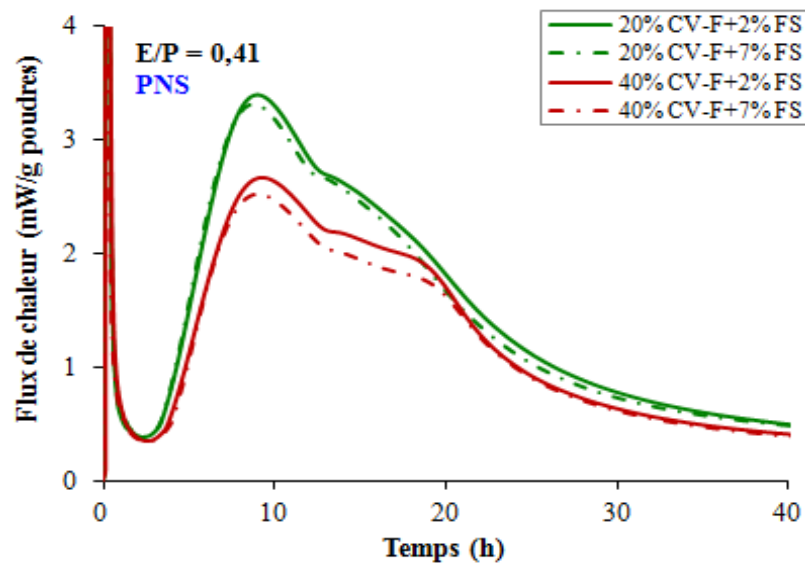
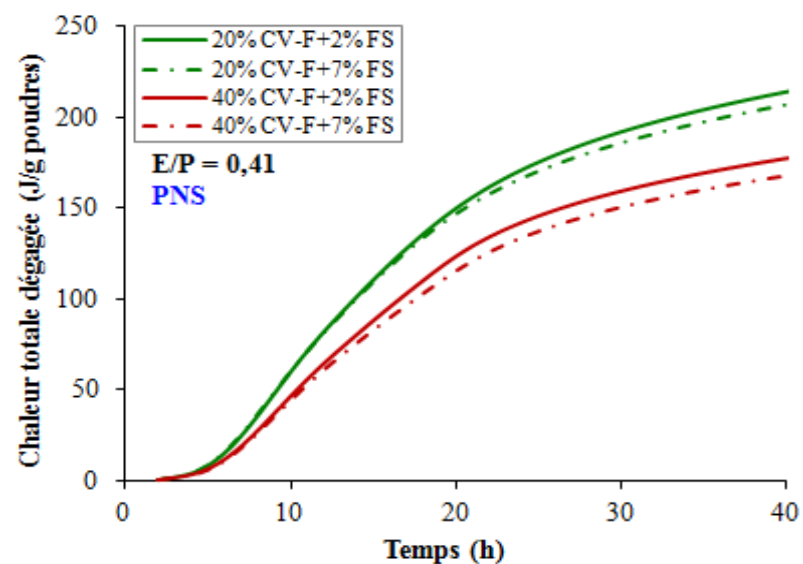


Figure 7.19 Effet du taux de remplacement total en poudres sur l'intensité du flux thermique et de la chaleur totale dégagée au bout de 40 h d'hydratation des MBE-SF ternaires (étalement 210 ± 10 mm)

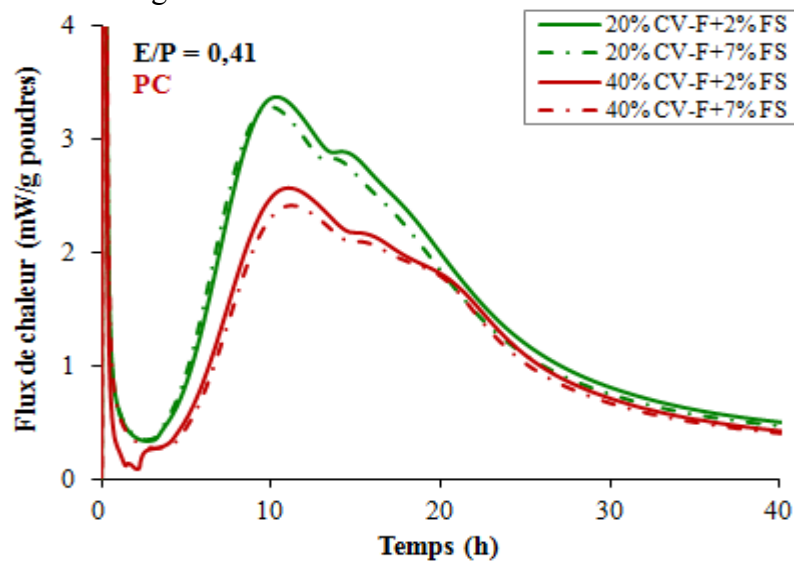


(a) Flux thermique

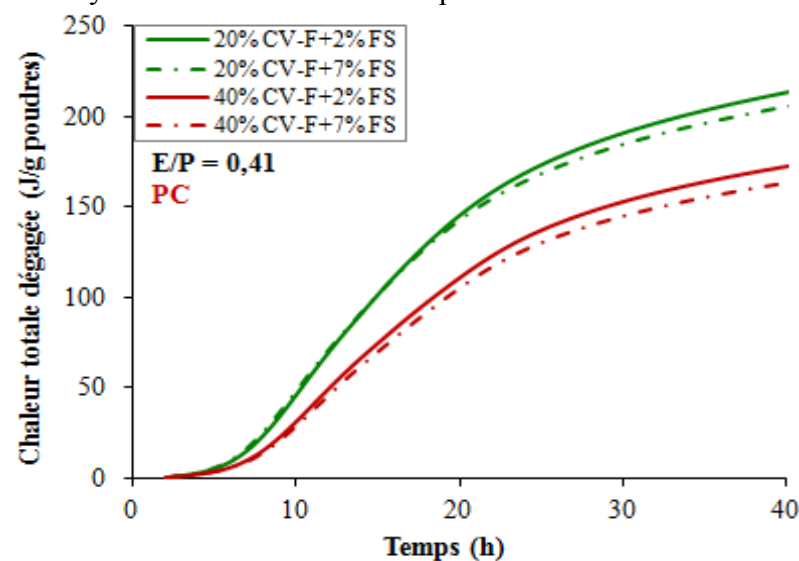


(b) Chaleur totale dégagée

Figure 7.20 Effet de la combinaison CV-F – FS sur la chaleur d'hydratation des MBE-SF en présence de PNS

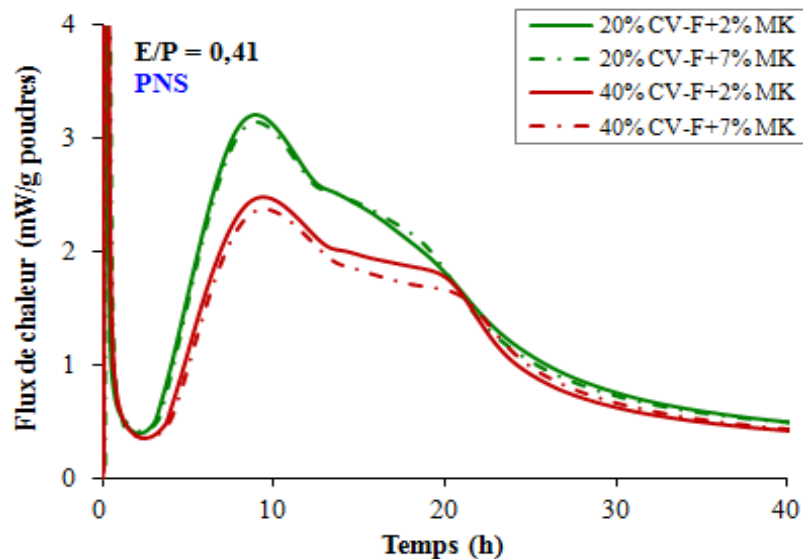


(a) Flux thermique

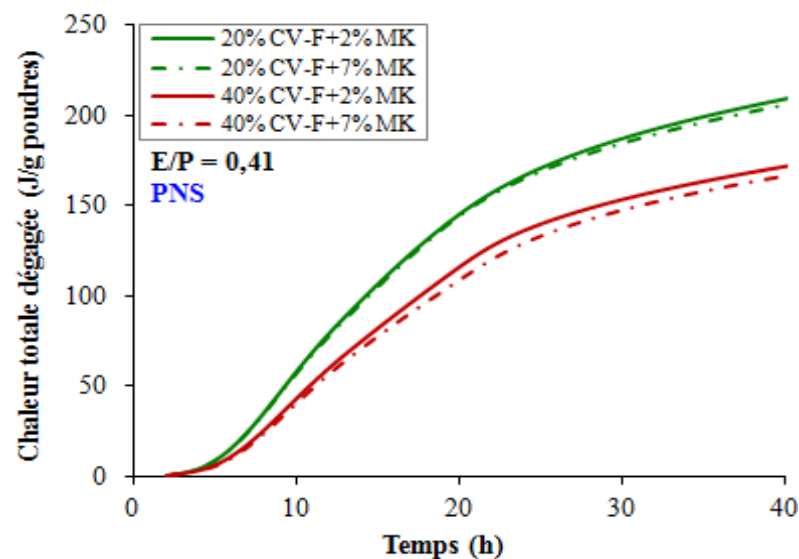


(b) Chaleur totale dégagée

Figure 7.21 Effet de la combinaison CV-F – FS sur la chaleur d'hydratation des MBE-SF en présence de PC

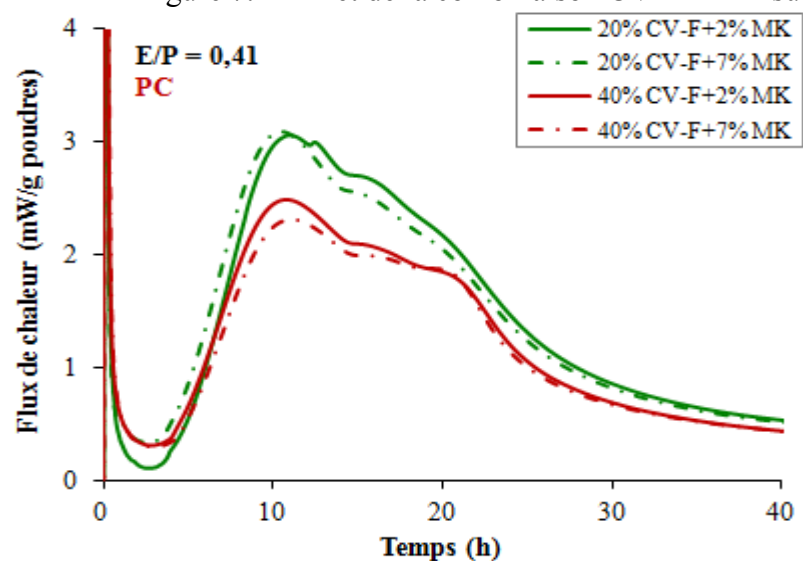


(a) Flux thermique

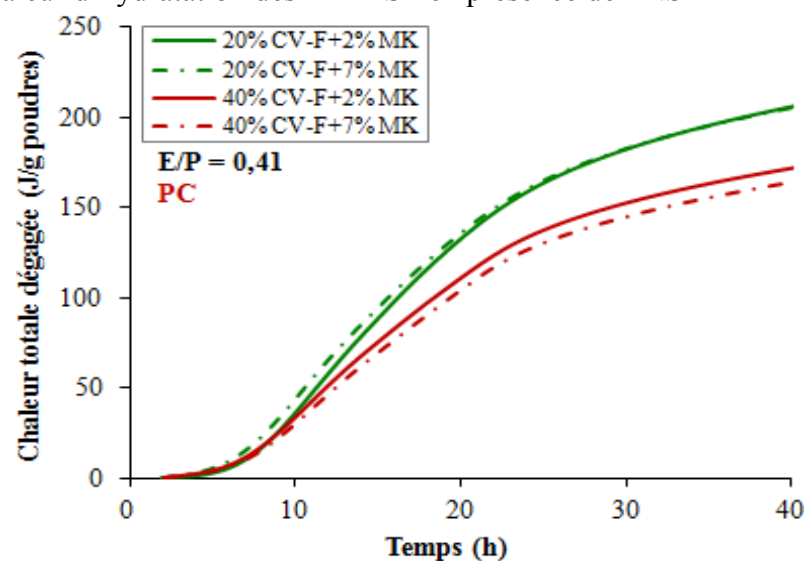


(b) Chaleur totale dégagée

Figure 7.22 Effet de la combinaison CV-F – MK sur la chaleur d'hydratation des MBE-SF en présence de PNS

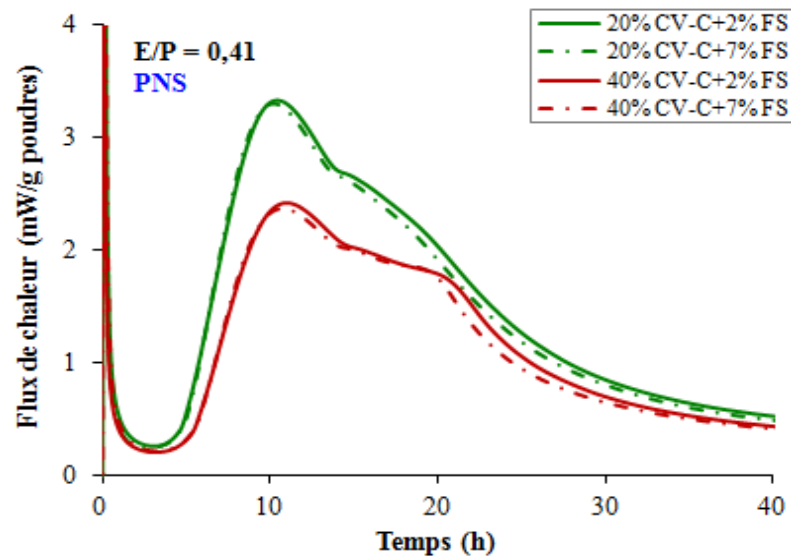


(a) Flux thermique

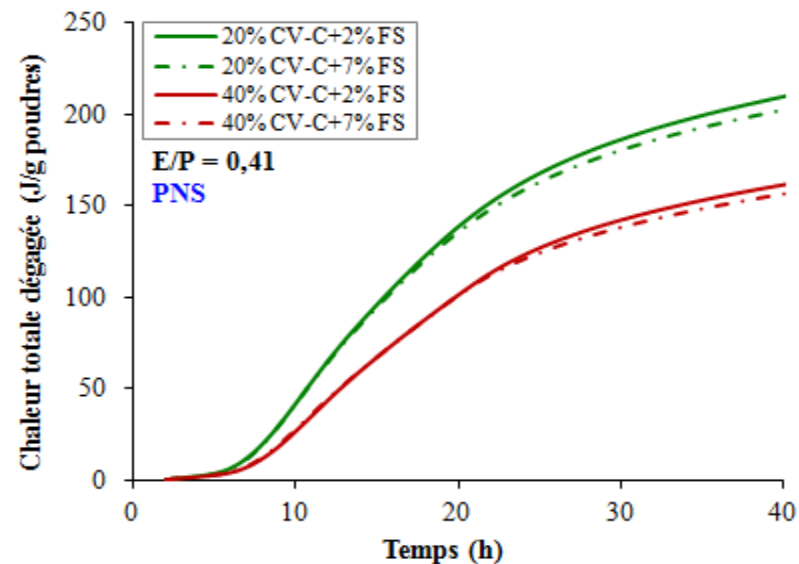


(a) Chaleur totale dégagée

Figure 7.23 Effet de la combinaison CV-F – MK sur la chaleur d'hydratation des MBE-SF en présence de PC

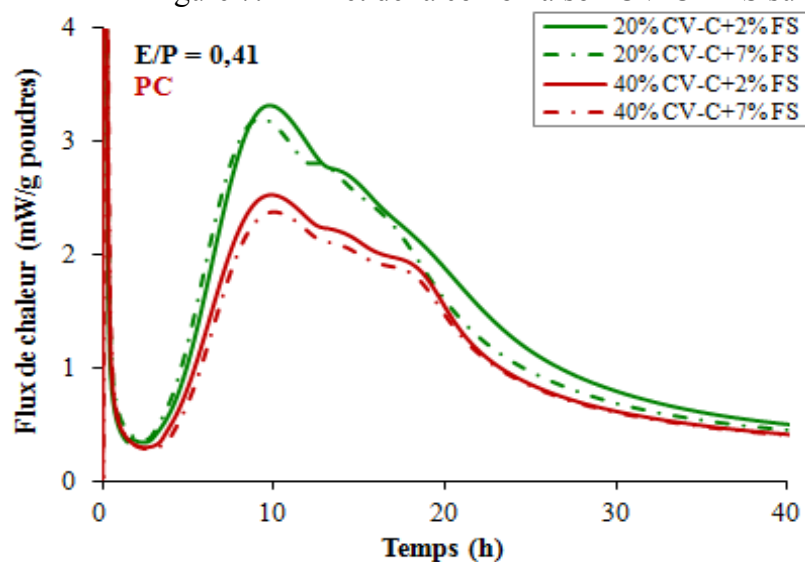


(a) Flux thermique

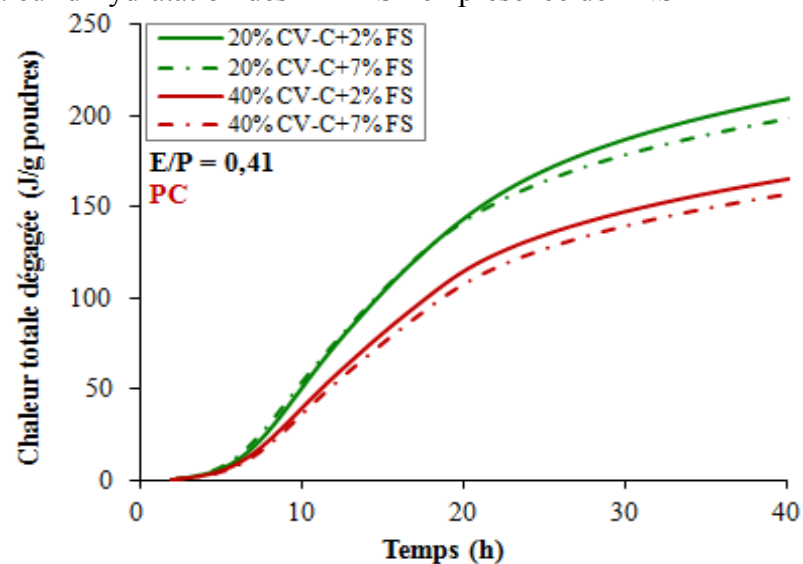


(b) Chaleur totale dégagée

Figure 7.24 Effet de la combinaison CV-C – FS sur la chaleur d’hydratation des MBE-SF en présence de PNS

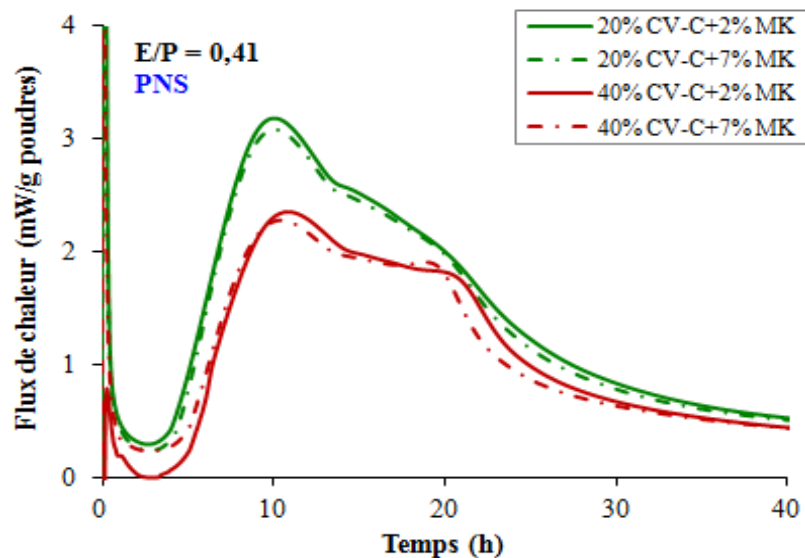


(b) Flux thermique

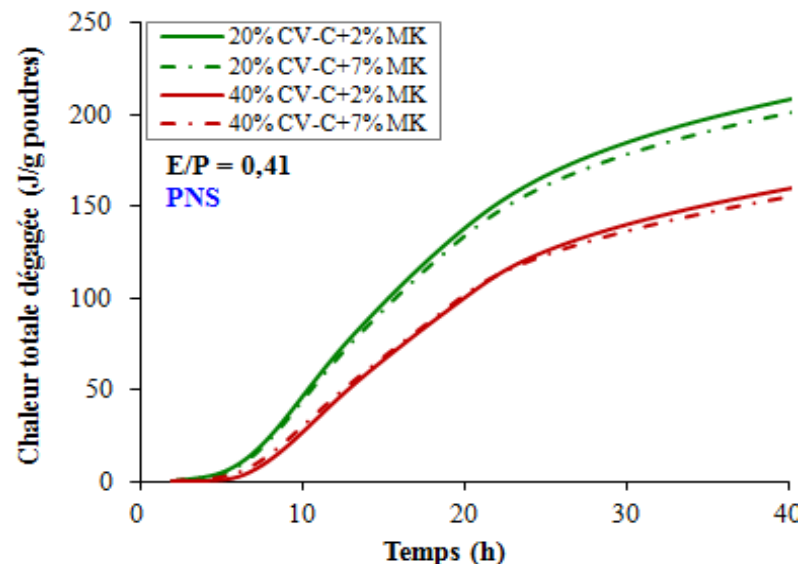


(b) Chaleur totale dégagée

Figure 7.25 Effet de la combinaison CV-C – FS sur la chaleur d’hydratation des MBE-SF en présence de PC

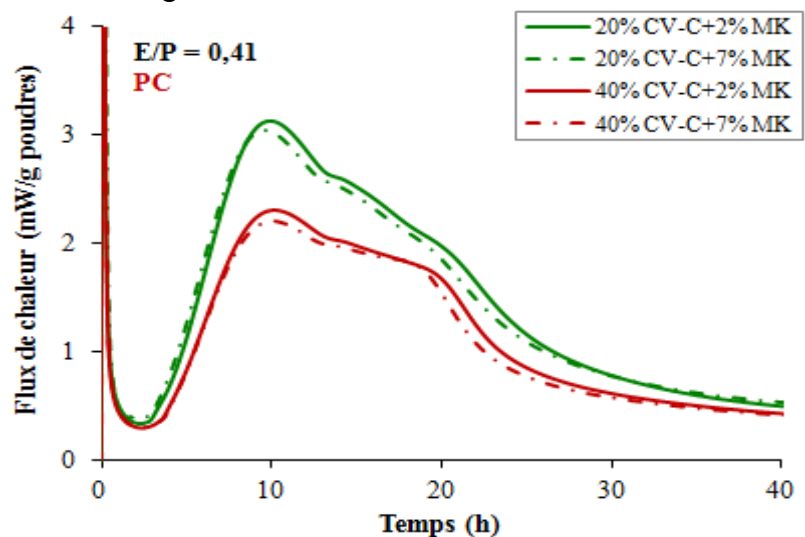


(a) Flux thermique

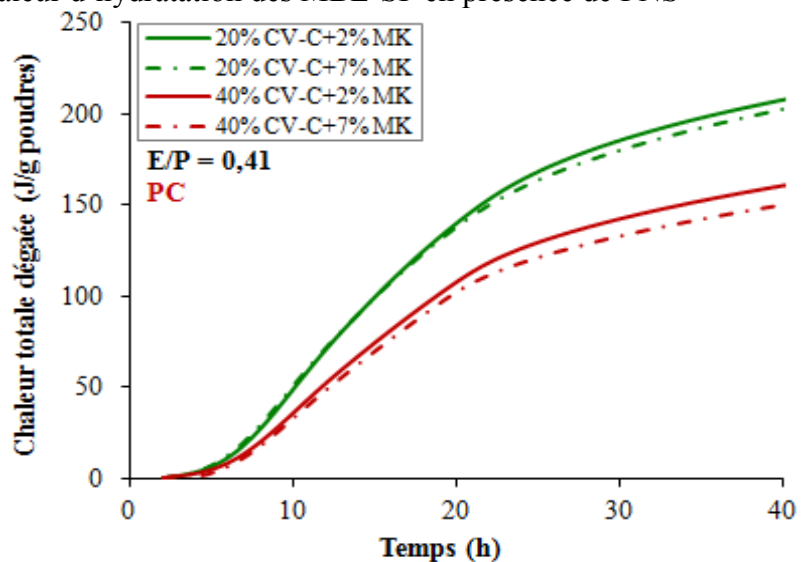


(b) Chaleur totale dégagée

Figure 7.26 Effet de la combinaison CV-C – MK sur la chaleur d'hydratation des MBE-SF en présence de PNS

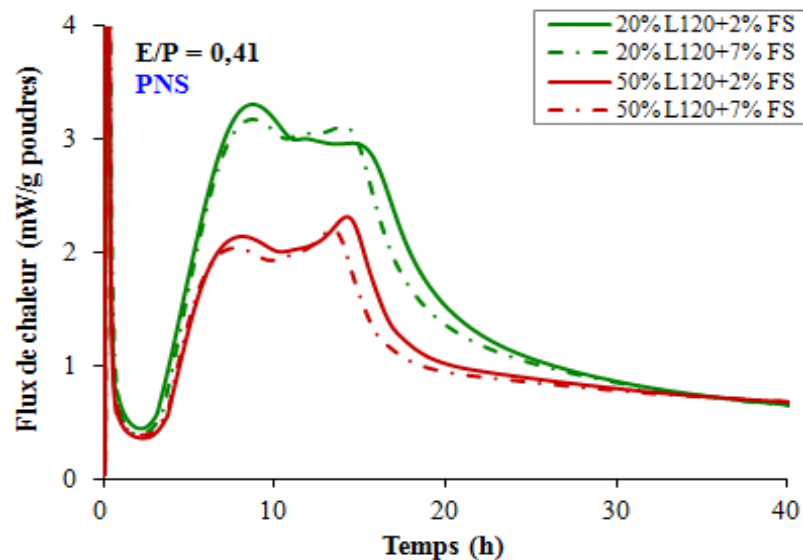


(a) Flux thermique

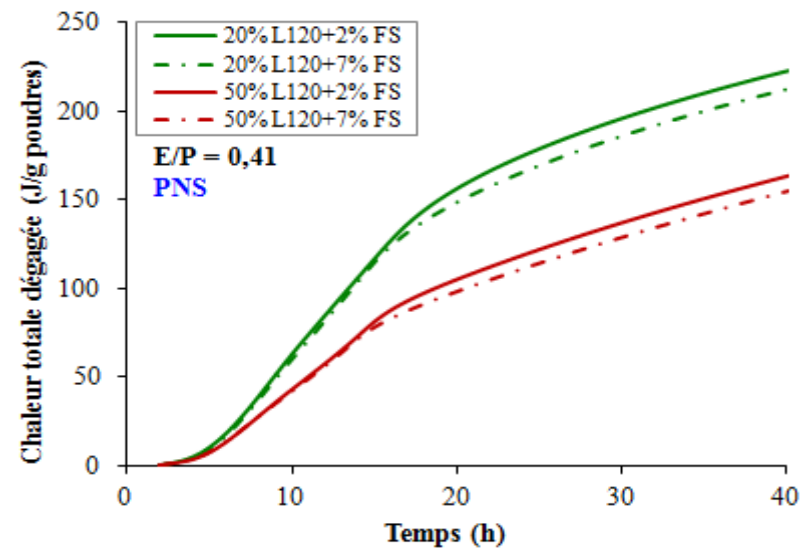


(b) Chaleur totale dégagée

Figure 7.27 Effet de la combinaison CV-C – MK sur la chaleur d'hydratation des MBE-SF en présence de PC

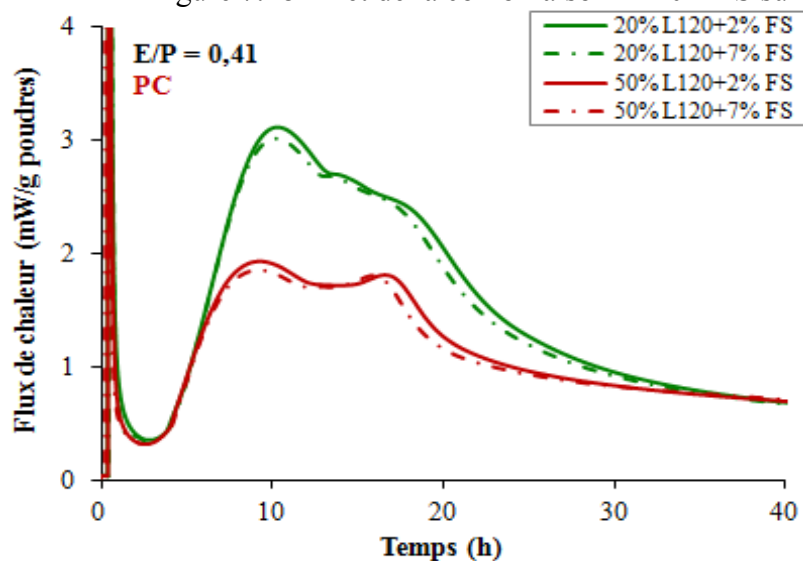


(a) Flux thermique

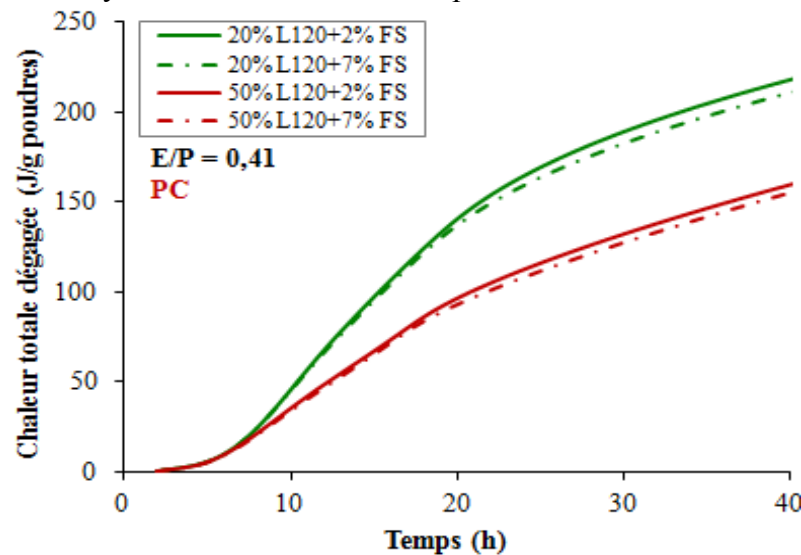


(b) Chaleur totale dégagée

Figure 7.28 Effet de la combinaison L120 – FS sur la chaleur d’hydratation des MBE-SF en présence de PNS

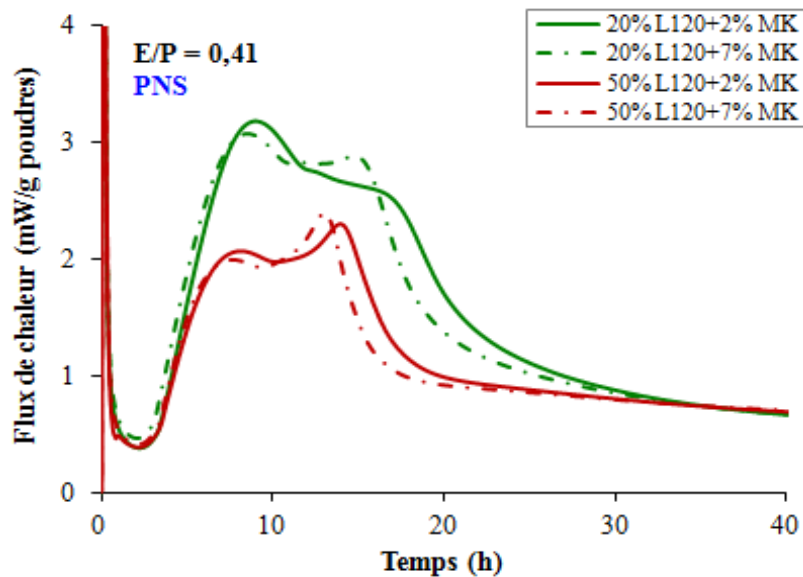


(a) Flux thermique

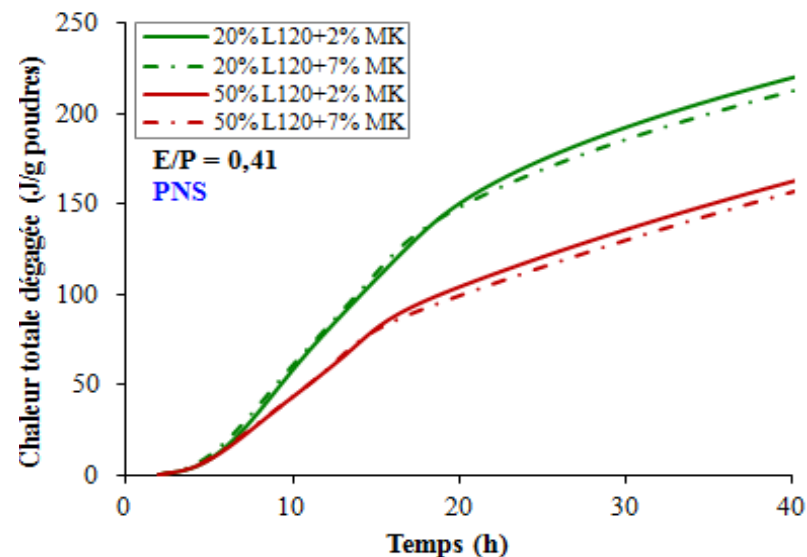


(b) Chaleur totale dégagée

Figure 7.29 Effet de la combinaison L120 – FS sur la chaleur d’hydratation des MBE-SF en présence de PC

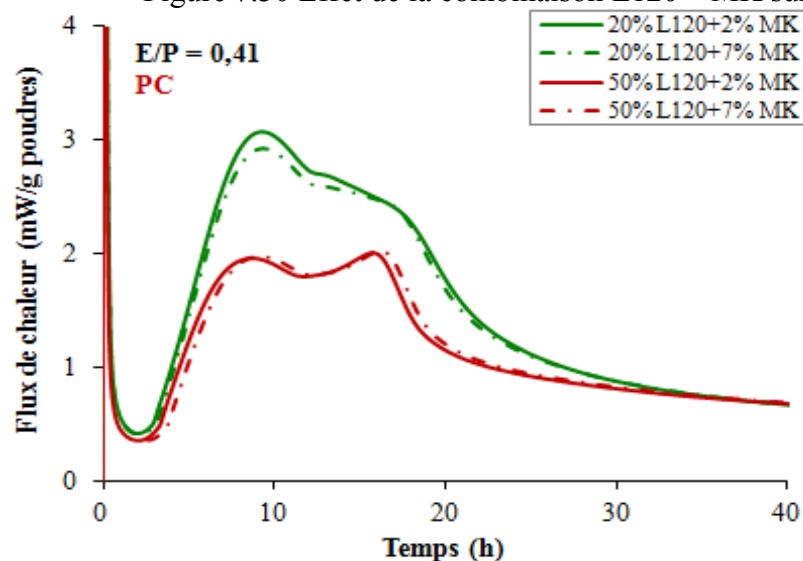


(a) Flux thermique

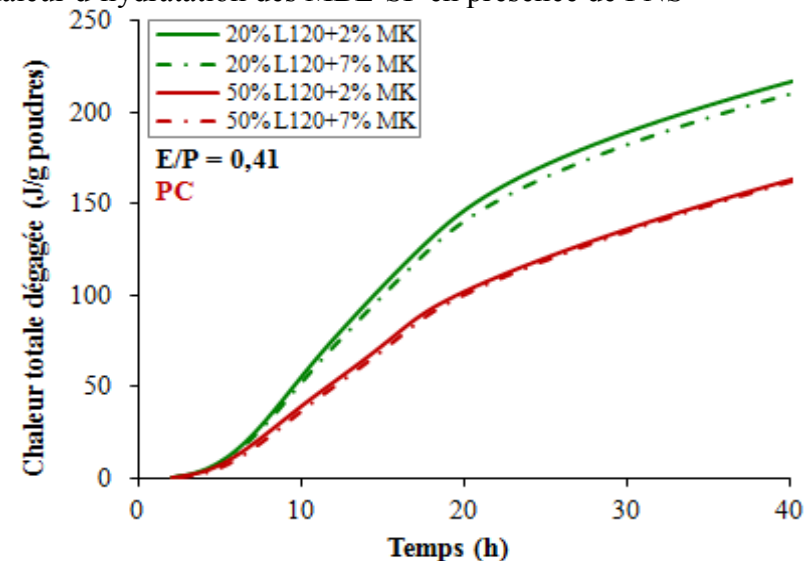


(b) Chaleur totale dégagée

Figure 7.30 Effet de la combinaison L120 – MK sur la chaleur d'hydratation des MBE-SF en présence de PNS



(a) Flux thermique



(b) Chaleur totale dégagée

Figure 7.31 Effet de la combinaison L120 – MK sur la chaleur d'hydratation des MBE-SF en présence de PC

Tableau 7. 29 Valeurs caractéristiques des courbes d'hydratation des MBE-SF ternaires

	Poudre à faible réactivité (%)	Poudre à réactivité élevée (%)	Remplacement Totale (%)	PNS			PC		
				t (q _{max}) (h)	q _{max} (mW/g _p)	Q _{40h} (J/g _p)	t (q _{max}) (h)	q _{max} (mW/g _p)	Q _{40h} (J/g _p)
REF	0	0	0	8,0	4,29	245	9,2	4,19	243
CV-F-FS	20	2	22	8,9	3,40	214	10,3	3,37	213
	20	7	27	9,1	3,30	207	10,6	3,24	205
	40	2	42	9,1	2,66	177	10,9	2,57	172
	40	7	47	9,1	2,52	168	11,2	2,41	163
CV-F-MK	20	2	22	8,8	3,21	209	10,5	3,03	206
	20	7	27	9,1	3,14	206	10,3	3,08	206
	40	2	42	9,4	2,50	172	10,8	2,48	172
	40	7	47	9,4	2,37	167	10,8	2,31	164
CV-C-FS	20	2	22	10,0	3,29	210	9,7	3,31	209
	20	7	27	10,0	3,29	202	9,3	3,20	198
	40	2	42	10,3	2,37	162	9,7	2,52	166
	40	7	47	10,5	2,35	157	9,7	2,37	157
CV-C-MK	20	2	22	9,9	3,18	208	9,8	3,14	208
	20	7	27	10,2	3,09	201	9,9	3,03	203
	40	2	42	10,6	2,36	160	9,9	2,30	160
	40	7	47	10,1	2,28	156	9,7	2,19	151
L120-FS	20	2	22	8,7	3,30	223	10,4	3,13	218
	20	7	27	8,9	3,17	213	9,9	3,02	211
	50	2	52	8,0	2,14	163	9,2	1,94	160
	50	7	57	7,7	2,04	155	9,3	1,86	155
L120-MK	20	2	22	9,0	3,19	220	9,2	3,08	218
	20	7	27	8,5	3,07	213	9,2	2,93	211
	50	2	52	7,8	2,07	163	8,3	1,93	163
	50	7	57	7,5	2,00	157	8,5	1,95	162

q_{max} (mW/g_p): intensité maximale du 2^{ème} pic d'hydratation exprimé en mW par gramme de poudres,

t(q_{max}): temps correspondant au 2^{ème} pic maximal, Q_{40h} (J/g_p): chaleur totale dégagée au bout de 40 h d'hydratation exprimée en Joule par gramme de poudres.

7.4.5 Perte de maniabilité des MBE-SF contenant les ciments ternaires

Comme les MBE présentent une consistance semi-fluide, les pertes de fluidité qui ont été notées sont assez importantes en comparaison avec les mélanges autoplçants. Néanmoins, même si le critère de rétention est important mais un ajustement en SP, à 60 min du contact

eau-poudres, peut être préconisé lors de la validation à l'échelle du béton si ce dernier ne présente pas la fluidité visée. Toutefois, il est bien apprécié que les mélanges qui seront validés présentent des pertes de fluidité limitées en fonction du temps. Les mélanges en présence de PC ont présenté des pertes de fluidité moins importantes en comparaison avec ceux en présence de PNS, une différence des pertes qui peut aller jusqu'à 50% entre les deux SP. Les combinaisons qui ont montré les plus faibles pertes de fluidité sont CV-C – FS et CV-C – MK en présence de PC où à 60 min du temps de contact eau-ciment, les pertes maximales sont de 20% et 29%, respectivement. Par contre, les pertes les plus importantes ont été notée avec les combinaisons CV-F – MK et L120 – MK en présence de PNS avec des pertes maximales allant jusqu'à 42%.

7.4.6 Effet des ciments ternaires sur la résistance à la compression des MBE-SF

Les résistances f'_{c1} , f'_{c28} et f'_{c91} des MBE-SF ternaires sont illustrées dans les diagrammes des contours des figures 7.32, 7.33 et 7.34, respectivement. Les résultats statistiques montrent que les poudres à réactivité élevée n'ont pas un effet notable sur le développement des résistances à jeune âge (f'_{c1}). En effet, l'élévation du taux de remplacement de la FS ou du MK jusqu'à 7% dans les MBE-SF contenant 30% CV-F (ou 30% CV-C ou 35% L120) entraîne généralement des baisses des f'_{c1} qui n'excèdent pas 10% par rapport à celles qui contiennent 2% de FS ou de MK. À l'exception des combinaisons CV-C – MK (PNS) et L120 – FS (PC), cette différence est de 20 à 26%. Par ailleurs, pour un pourcentage moyen de la FS ou du MK, l'augmentation du taux de remplacement des poudres à faible réactivité a engendré une diminution systématique des f'_{c1} . Les diminutions les plus importantes ont été notées dans les MBE-SF contenant les combinaisons CV-C – MK (PNS) et L120 – FS (PC) où le passage du taux de remplacement minimal au taux de remplacement maximal a entraîné des réductions de 56 et 53%, respectivement.

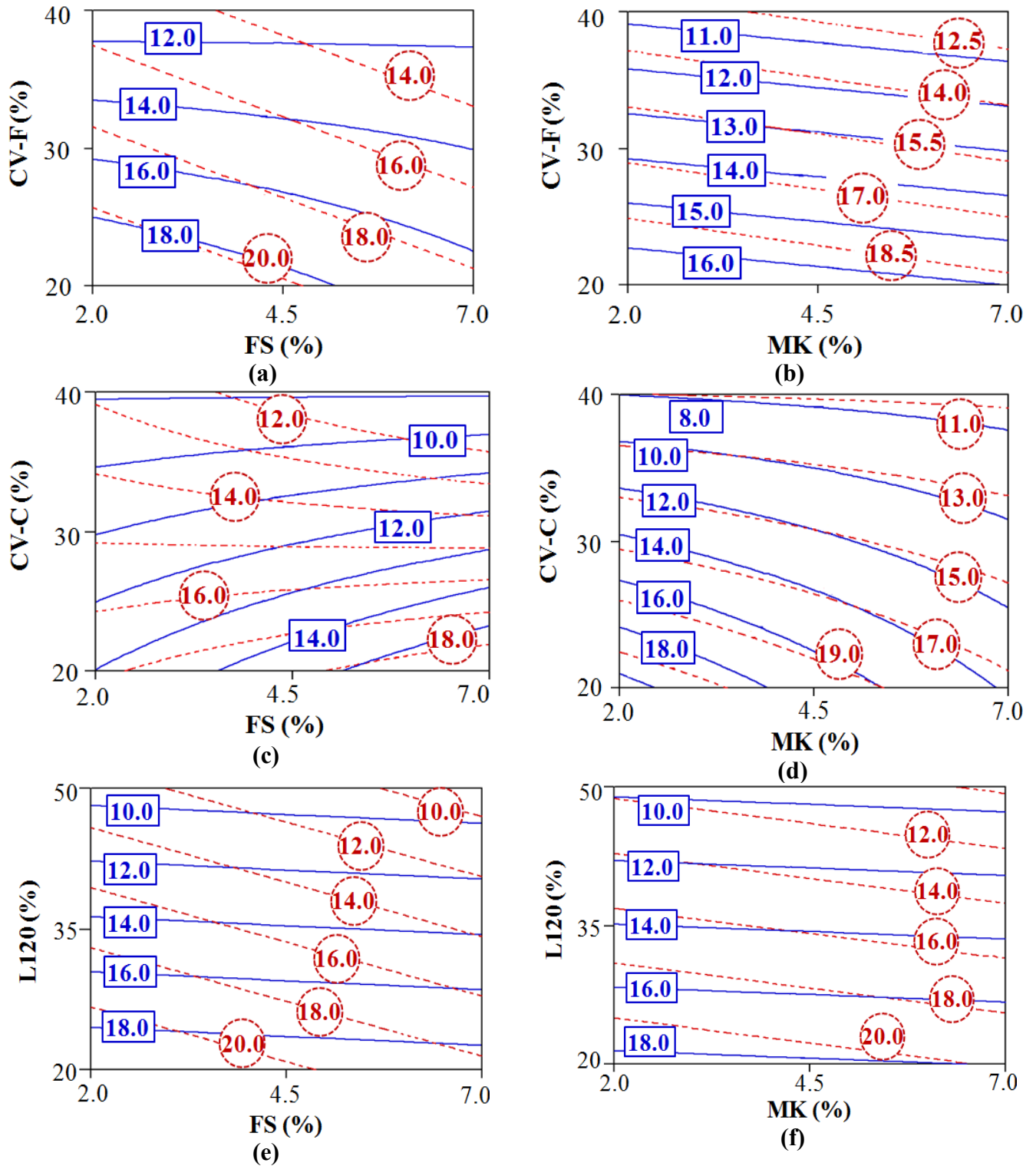


Figure 7.32 Diagramme de contour des f'_{ci} des MBE-SF (étalement 210 ± 10 mm) avec les combinaisons ternaires: (a) CV-F – FS (b) CV-F – MK (c) CV-C – FS (d) CV-C – MK (e) L120 – FS (f) L120 – MK (trait plein : MBE-SF avec PNS; trait en pointillés : MBE-SF avec PC)

Pour les deux cas de SP, la combinaison de la CV-F avec la FS (ou MK) s'est avérée plus avantageuse au niveau des f'_{c1} où elle a donné des MBE-SF dont les f'_{c1} sont 20% plus importantes par rapport à ceux avec la combinaison CV-C – FS (ou MK). Il est remarqué aussi que toutes les combinaisons ternaires en présence de PNS ont donné des MBE-SF avec des f'_{c1} similaires à celles des MBE-SF en présence de PC.

À 28 jours, un important gain de résistance est noté pour toutes les combinaisons avec une légère avance pour les MBE-SF en présence de PC. Généralement, les f'_{c28} des MBE-SF avec le PC sont 20% plus importantes que celles des MBE-SF en présence de PNS (figure 7.33). Les modèles statistiques des f'_{c28} sont variables d'une combinaison à une autre, dans certaines combinaisons comme CV-F – FS (PNS), CV-F – MK (PNS et PC), CV-C – MK (PC) et L120 – MK (PNS), la tendance est linéaire avec un effet négatif des poudres à faible réactivité et effet variable des poudres à réactivité élevée. Lorsque la contribution de ces dernières est favorable sur les f'_{c28} , l'effet peut être estimé entre 26% à 70% de celui des poudres à faibles réactivité, alors que ça n'excède pas 20% lorsque cette contribution est négative. Pour les autres combinaisons, statistiquement, un effet synergétique entre les poudres à faible réactivité et celles à réactivité élevée est noté. Pour la majorité des cas, cet effet est négatif et tend à diminuer f'_{c28} .

L'utilisation du MK comme poudre à réactivité élevée a montré, généralement, une performance acceptable du fait que les f'_{c28} maximales se situent toujours au niveau du pourcentage de remplacement maximal en MK. Cependant, cette performance peut être assez limitée en comparaison à celle de la FS où cette dernière a donné une contribution deux fois plus importante que celle du MK. De plus, le MK semble avoir une meilleure performance au niveau de f'_{c28} en le combinant avec le L120 ou la CV-C en comparaison avec la CV-F. Pour les deux types de SP, la combinaison de la CV-C ou le L120 avec le MK a donné des MBE-SF dont les f'_{c28} sont de juste 5% moins importantes par rapport à ces mêmes mélanges mais qui sont combinés avec la FS. Tandis que la différence entre les f'_{c28} des systèmes CV-F – FS et CV-F – MK va jusqu'à 23%. De plus, les MBE-SF qui ont fourni les f'_{c28} les plus importantes sont ceux qui contiennent les combinaisons L120 – FS et L120 – MK avec les deux cas de SP.

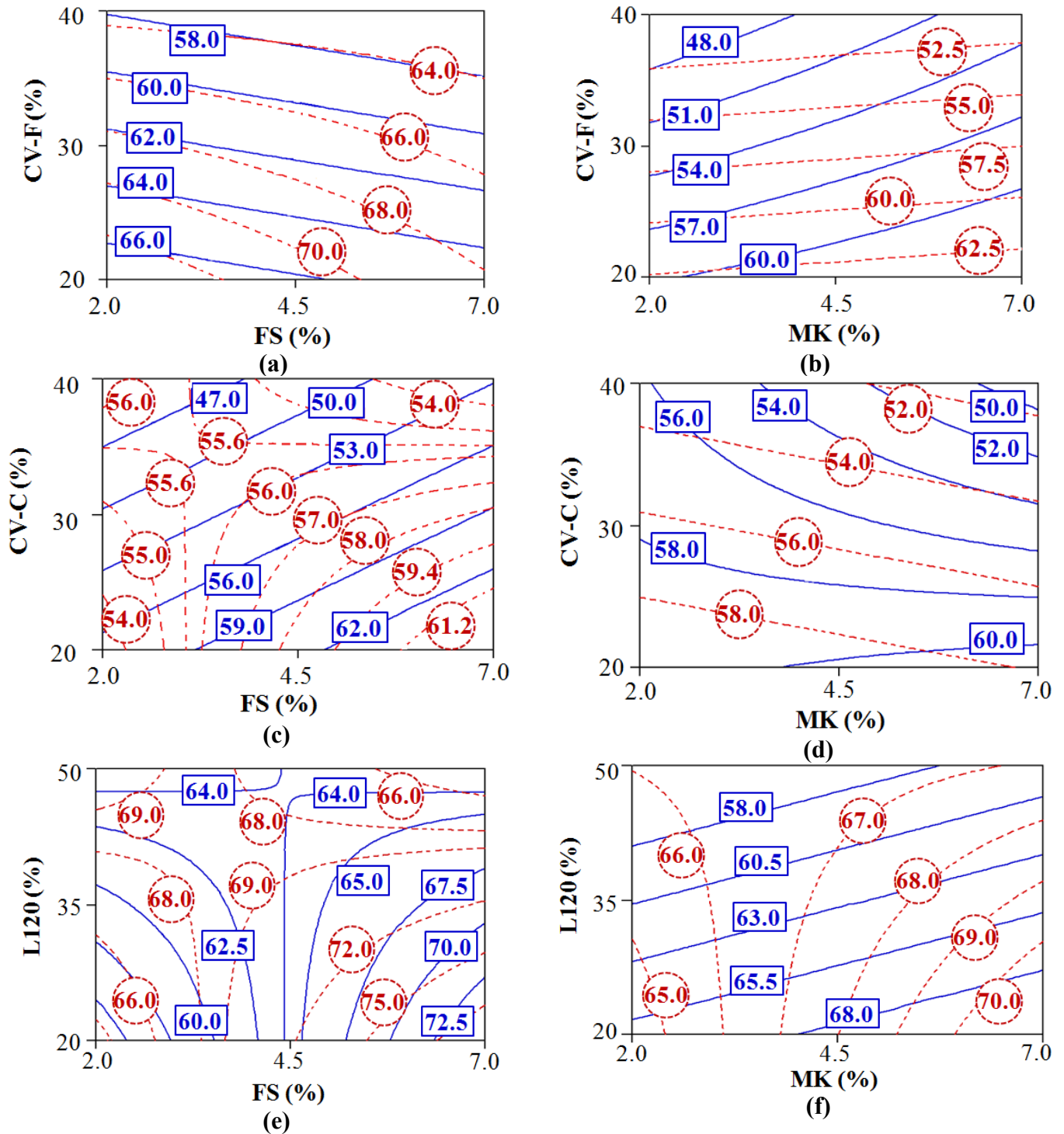


Figure 7.33 Diagramme de contour des f'_{c28} des MBE-SF (étalement 210 ± 10 mm) avec les combinaisons ternaires: (a) CV-F – FS (b) CV-F – MK (c) CV-C – FS (d) CV-C – MK (e) L120 – FS (f) L120 – MK (trait plein : MBE-SF avec PNS; trait en pointillés : MBE-SF avec PC)

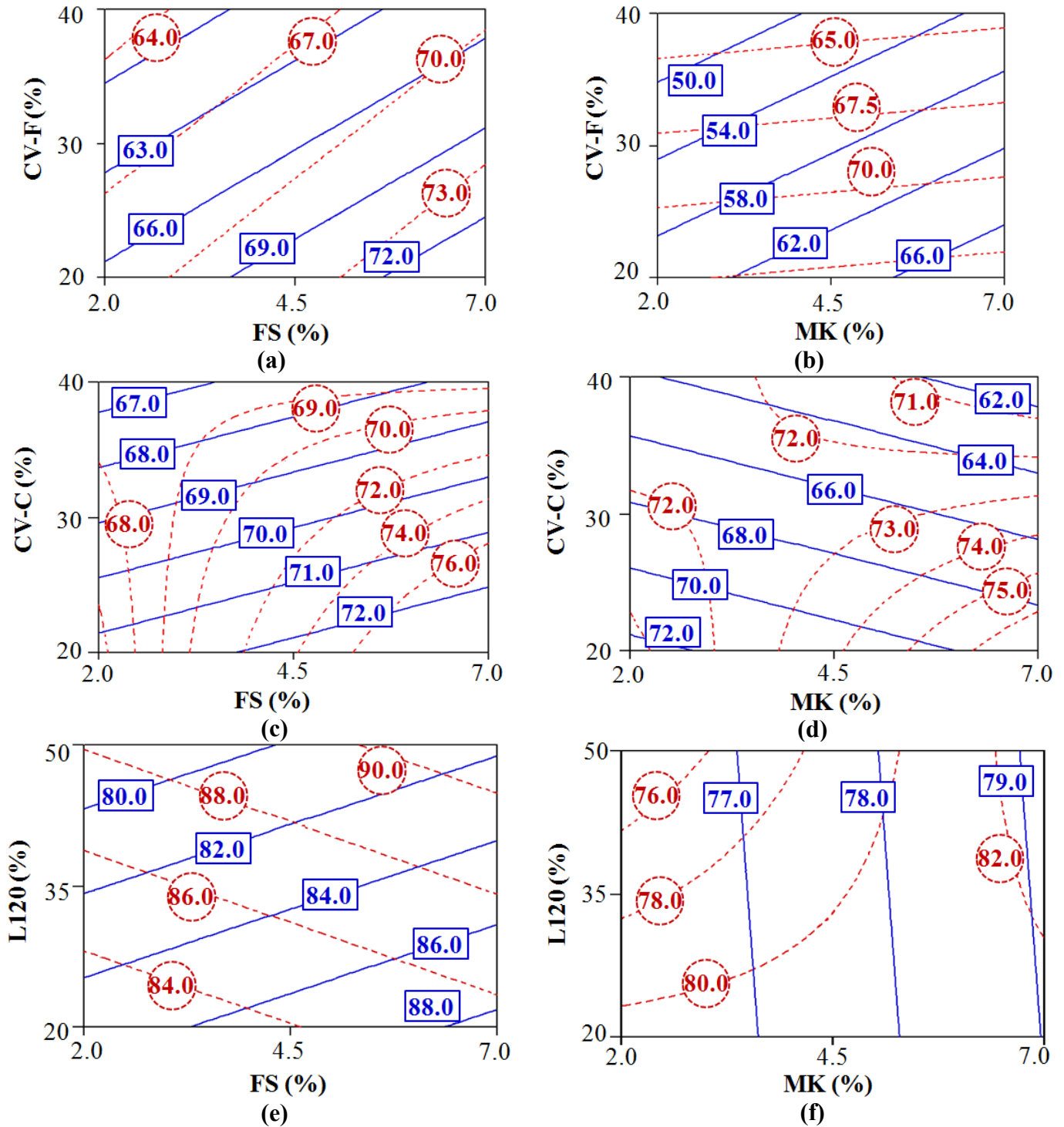


Figure 7.34 Diagramme de contour des f'_{c91} des MBE-SF (étalement 210 ± 10 mm) avec les combinaisons ternaires: (a) CV-F – FS (b) CV-F – MK (c) CV-C – FS (d) CV-C – MK (e) L120 – FS (f) L120 – MK (trait plein : MBE-SF avec PNS; trait en pointillés : MBE-SF avec PC)

Quant aux MBE-SF ternaires contenant la CV-C, les f'_{c28} obtenues sont plus faibles que celles des MBE-SF qui contiennent la CV-F. Toutefois, le développement des f'_{c91} par rapport à f'_{c28} est meilleur pour les mélanges qui contiennent la CV-C que ceux qui contiennent la CV-F (figures 7.34). Il s'agit d'un gain qui varie de 11% à 50% pour les combinaisons CV-C – FS (PNS ou PC) et de 19% à 36% avec CV-C – MK (PNS ou PC) par rapport à f'_{c28} . Tandis que, ce gain n'a pas dépassé 10% et 27% pour les combinaisons CV-F – FS et CV-F – MK (PNS ou PC), respectivement. En termes de valeurs propres, des f'_{c91} de 77 et 81 MPa ont été obtenues avec les mélanges 20% CV-C + 7% MK (PC) et 20% CV-C + 7% FS (PC), respectivement. Pour les mélanges 20% CV-F + 7% MK (PC) et 20% CV-F + 7% FS (PC), les f'_{c91} obtenues sont de 73 et 75 MPa, respectivement.

Les MBE-SF ternaires qui contiennent le L120 (20% à 50% en remplacement de ciment) ont continué à avoir un bon développement de f'_{c91} qui varie de 18% à 48% en présence de la FS (2% à 7%) et de 12 à 40% en présence de MK (2% à 7%) par rapport à f'_{c28} . En effet, une f'_{c91} de 90 MPa a été notée avec le mélange 50% L120 – 7% FS en présence de PC et de 88 MPa avec ce même mélange en présence de PNS.

7.4.7 Synthèse

Cette section a fait l'objet de l'étude des systèmes ternaires sur les propriétés à l'état frais, le dégagement de chaleur et la résistance à la compression des MBE semi-fluides (MBE-SF), correspondants aux bétons destinés aux infrastructures de transport, utilisant la méthode des plans d'expérience. Différentes combinaisons ont été testées pour en tirer les bénéfices de la combinaison d'une poudre à faible réactivité (CV-F, CV-C et L120) avec une poudre à réactivité élevée (FS et MK). Le rapport E/P est de 0,41 avec un dosage en poudres de 400 kg/m³ et une demande en SP ajustée pour atteindre une consistance semi-fluide (210 ± 10 mm). Les conclusions suivantes ont été soulignées à travers cette étude :

- À cause de leurs finesses élevées, les poudres à réactivité élevée (FS et MK) ont toujours manifesté une tendance à accroître la demande en SP. Ceci est noté de même pour l'effet d'interaction obtenue de la combinaison des deux types de poudres qui a tendance à augmenter la demande en SP aussi. Par ailleurs, la contribution des poudres à faibles

réactivité (CV-F et L120) est assez faible (par rapport à la FS et MK) mais qui est variable et dépend essentiellement du type de la poudre et du SP utilisés.

- Les demandes en SP les moins importantes de tous les systèmes ternaires ont été notées avec les combinaisons CV-C – FS et CV-C – MK avec des valeurs respectives de 0,45% à 0,72% et de 0,47% à 0,60% pour le PNS et de 0,13% à 0,18 et de 0,11% à 0,14% pour le PC. Par contre, les demandes en SP les plus importantes ont été obtenues avec les combinaisons CV-F – FS et CV-F – MK avec des pourcentages respectifs de 0,62% à 0,81% et de 0,58% à 0,80% pour le PNS et de 0,15% à 0,25% et de 0,16 à 0,20% pour le PC.
- La combinaison du L120 (20% à 50%) avec du MK (2% à 7%) a donné lieu des MBE-SF avec les viscosités plastiques les plus élevées par rapport aux autres combinaisons. Des valeurs comprises entre 6,0 et 8,4 Pa.s ont été obtenues en présence du PC et d'autres comprises entre 5,0 et 12,4 Pa.s en présence du PNS où les deux poudres ont fortement contribué dans l'accroissement de ces valeurs. À l'opposé, grâce à leur forme sphérique, le système CV-C – FS est la parfaite combinaison qui peut donner des MBE-SF avec les viscosités les plus faibles pour cette gamme de consistance. En effet, des valeurs de 2,5 à 3,9 Pa.s et de 3,2 à 4,3 ont été retrouvées en présence de PNS et PC, respectivement.
- Le dégagement de chaleur des MBE-SF ternaires dépend exclusivement du taux de remplacement de la poudre à faible réactivité, où le type de cette dernière n'a pas un effet significatif. Pour des taux de remplacement maximaux des combinaisons ternaires, la chaleur totale dégagée par les MBE-SF est diminuée de 20% pour un remplacement total de 47% et de 27% pour un remplacement total de 57%. De plus, l'augmentation du pourcentage des poudres à réactivité élevée (FS et MK de 2% à 7%) n'a pas présenté un effet notable sur les courbes du flux thermique et la chaleur totale dégagée par les mélanges ternaires.
- Tous les MBE-SF ternaires ont fourni un bon développement de f'_c au bout de 24 h d'hydratation, avec des f'_{c1} supérieures à 8 MPa, ce qui assure un démoulage sans soucis.
- L'utilisation du MK comme une alternative de la FS a montré une performance acceptable au niveau des f'_{c28} . Les résultats sont satisfaisants surtout en combinant le MK avec la CV-C et le L120. D'ailleurs, les MBE-SF contenant les combinaisons L120 – FS et L120 – MK

ont présenté les f'_{c28} les plus élevées de tous les systèmes ternaires. Les valeurs respectives sont 55 à 73 MPa et 55 à 71 MPa en présence de PNS et 66 à 78 MPa et 65 à 71 MPa en présence de PC. Les MBE-SF qui ont présenté les f'_{c28} les plus faibles sont ceux qui contiennent la combinaison CV-F – MK avec des valeurs allant de 45 à 64 MPa en présence de PNS et de 50 à 63 MPa en présence de PC.

- Les f'_{c91} sont très élevées pour les MBE-SF contenant la combinaison L120 – FS avec des valeurs allant jusqu'à 88 et 90 MPa en présence de PNS et PC, respectivement. Par ailleurs, les gains les plus importants en termes de f'_{c91} comparativement aux f'_{c28} ont été présentés par les MBE-SF ternaires contenant la CV-C qui a pu atteindre 50% et 36% en combinaison avec la FS et le MK, respectivement, et ceci avec les deux cas de SP.

7.5 CONCLUSIONS

Au cours de ce chapitre, une étude étendue, moyennant la méthode des plans d'expérience a été menée sur l'effet de la combinaison de deux AM sur les propriétés des MBE-AP et des MBE-SF en présence à tour de rôle de deux types de SP avec et sans AV compatibles. Les propriétés étudiées sont les propriétés rhéologiques, cinétique d'hydratation ainsi que le développement des résistances à la compression jusqu'à 91 jours. Les conclusions principales se récapitulent comme suit :

- Pour les MBE-AP ternaires, les modèles obtenus des différentes réponses sont généralement linéaires ce qui signifie, statistiquement, qu'il n'y a pas d'effet d'interaction entre la combinaison d'une poudre à réactivité élevée avec une autre à faible réactivité. Tandis que, pour les MBE-SF, les modèles obtenus pour les différentes réponses sont divisés entre des modèles linéaires et d'autres d'interaction. Il semble que le rapport E/P assez élevé (0,45) des MBE-AP a masqué l'effet synergétique qui peut avoir entre les poudres. Cet effet a commencé légèrement à apparaître avec la diminution du rapport E/P (0,41) des MBE-SF, mais moins concluant du fait que ce rapport n'était pas suffisamment faible.
- Que ce soit pour les MBE-AP ou les MBE-SF ternaires, les poudres à faible réactivité comme la CV-C, L100, L120 et CC3 ont manifesté une tendance à diminuer la demande en SP. Cependant, cette tendance a été masquée par l'effet des poudres à réactivité

élevée (FS et MK) qui ont présenté une contribution à augmenter la demande en SP de trois à neuf fois plus importante que celle des poudres à faible réactivité.

- Les MBE-AP contenant CC3 – FS (PC-AV2) ont présenté les plus faibles viscosités plastiques ($1,1 \pm 0,3$ Pa.s), d'où une attention particulière doit être apportée vis-à-vis la stabilité des mélanges qui seront validés à l'échelle du béton. Pour les MBE-SF, les viscosités les plus faibles ont été obtenues en combinant la CV-C avec la FS ou des μ_{pl} d'ordre de $3,2 \pm 0,7$ Pa.s et de $3,8 \pm 0,6$ ont été trouvées en présence de PNS et PC, respectivement. Pour ce genre de consistance, il n'y a pas de crainte au niveau de la stabilité de ces milieux qui s'est avérée adéquate grâce au caractère semi-fluide.
- Des viscosités plastiques allant jusqu'à 6,2 Pa.s ont pu être obtenues pour les MBE-AP ternaires en combinant la CV-F avec le MK en présence du couple PNS-AV1. Alors que pour les MBE-SF, les μ_{pl} les plus importantes ont été obtenues avec la combinaison L120 – MK. En effet, des valeurs allant jusqu'à 8,4 et 12,4 Pa.s ont caractérisé ces mélanges en présence du PNS et PC, respectivement. Ces valeurs de μ_{pl} sont très considérables et peuvent donner des mélanges nécessitant plus de consolidation lors de la mise en place, ce qui sera évalué lors de la validation à l'échelle du béton.
- Tous MBE-AP ternaires ont maintenu leur caractère autoplaçant jusqu'à 60 min après le contact eau-poudres, sauf les mélanges contenant la combinaison CC3 – FS qui ont présenté une consistance semi-fluide en présence de PNS-AV1 (étalement de 220 ± 20 mm).
- La chaleur d'hydratation des MBE-AP a été fortement influencée par les différents systèmes ternaires. L'accroissement du taux de remplacement des poudres à faible réactivité a affecté la durée de la période dormante et l'intensité du 2^{ème} pic d'hydratation. De plus, le type du couple SP-AV et l'augmentation du pourcentage en FS ou MK ont influencé l'intensité du 3^{ème} pic d'hydratation. En effet, les mélanges de la combinaison CV-F – MK ont été marqué par des durées de la période dormante les plus prolongées de tous les MBE-AP ternaires de l'ordre de 9 h avec une chaleur totale dégagée de 175 J/g poudres. Tandis que les mélanges de la combinaison CC3 – FS ont donné lieu de plus courtes durées de la période dormante de $4 \pm 0,5$ h avec une chaleur

totale maximale de 225 J/g_{poudres}. Le dégagement de chaleur des MBE-SF était influencé exclusivement par le taux total de remplacement des poudres à faible réactivité et les poudres à réactivité élevée dont le type de ces poudres n'a pas joué un rôle notable. La durée de la période dormante pour tous les MBE-SF était de $3,7 \pm 0,7$ h et le dégagement total de la chaleur pour des taux de remplacement maximaux était de 210 ± 13 J/g_{poudres}.

- En plus de l'effet négatif des poudres à faible réactivité sur le développement des f'_{c1} , les poudres à réactivité élevée ont aussi manifesté, généralement, un effet négatif sur les f'_{c1} des MBE-AP. Un effet négatif qui peut aller jusqu'à 25% que celui des poudres à faible réactivité.
- Les MBE-AP contenant les combinaisons ternaires CV-F – FS et CV-F – MK ont exposé de très faibles f'_{c1} en présence de PNS-AV1. Les valeurs obtenues sont de l'ordre de 0,25 à 5 MPa et de 0,4 à 3 MPa, respectivement, ce qui est loin d'être suffisant pour un bon démoulage. Par conséquent, le choix de ces deux combinaisons est éliminé d'une éventuelle validation à l'échelle du BAP. Par ailleurs, tous les MBE-SF ternaires ont fourni des f'_{c1} supérieures à 8 MPa, ce qui assure un démoulage sans difficulté.
- L'augmentation du taux de remplacement du MK de 2 à 15% dans les MBE-AP ternaires n'a pas manifesté les attentes qui ont été déjà notées dans les ciments binaires au niveau des résistances. Statiquement, des contributions négatives ont été notées sur les résistances de jeune âge et jusqu'à 91 jours. En revanche, grâce au faible rapport E/P (0,45) des MBE-SF en comparaison avec les MBE-AP (0,41), l'utilisation du MK comme une alternative de la FS, a montré une performance acceptable au niveau des f'_{c28} . Les résultats des MBE-SF contenant les combinaisons L120 – FS et L120 – MK ont présenté les f'_{c28} les plus élevées de tous les systèmes ternaires. Les valeurs respectives vont jusqu'à 73 et 71 MPa en présence de PNS et jusqu'à 78 et 71 MPa en présence de PC. Les MBE-SF qui ont présenté les f'_{c28} les plus faibles sont ceux qui contiennent la combinaison CV-F – MK avec des valeurs maximales de l'ordre de 63 MPa pour les deux types de PNS et PC.
- Les f'_{c28} obtenues pour les MBE-AP contenant les systèmes L100 – FS et CC3 – FS, sont les plus importantes en comparaison avec les MBE-AP qui contiennent la CV-F.

Des valeurs de f'_{c28} allant jusqu'à 70 MPa ont été obtenues avec les première combinaisons comparativement à des valeurs comprises entre 23 à 61 MPa pour les MBE-AP ternaires contenant la CV-F.

- Les plus grands gains de résistance à 91 jours par rapport à 28 jours qui ont été notées pour les MBE-AP sont ceux qui contiennent la CV-F – FS avec une augmentation de 64% en présence de PC-AV2. Pour les MBE-SF, ce sont les mélanges contenant la CV-C qui ont manifesté le plus grand gain de résistance à 91 j qui a pu atteindre 50% et 36% en présence de la FS et de MK, respectivement, et ceci pour les deux types de SP.

Les résultats trouvés ci-haut à l'échelle des MBE seront exploités à travers une optimisation multiparamétrique dans le but de choisir des combinaisons présentant différentes propriétés rhéologiques qui seront validées à l'échelle du béton et qui feront l'objet du chapitre 8.

CHAPITRE 8 : VALIDATION SUR LE BÉTON

8.1 INTRODUCTION

Dans le but de développer des bétons fluides à haute performance à rhéologie adaptée écologiques et présentant les meilleurs rapports performance/prix, des ciments ternaires ont été sélectionnés à travers les résultats obtenus sur les MBE-AP et les MBE-SF ternaires. La sélection des ciments ternaires a été effectuée avec une optimisation multiparamétrique en utilisant un logiciel d'optimisation numérique. Les résultats ont donné cinq mélanges ternaires à valider sur des BAP pour la construction des bâtiments et 12 mélanges à valider sur les BSF destinés aux infrastructures de transport. Différents essais ont été entrepris à l'échelle du béton que ce soit à l'état frais ou l'état durci pour les deux types de béton afin d'évaluer la performance des mélanges ternaires sélectionnés. Comme le nombre de mélanges ternaires à valider sur les BSF (12 mélanges) est assez important pour étudier leur durabilité, la validation des BSF a été effectuée sur deux étapes. Une première étape de pré-validation où il était question d'étudier juste les propriétés à l'état frais, f'_c et le retrait de séchage de ces mélanges. Par la suite, quatre BSF ternaires présentant les meilleures performances avec différentes propriétés rhéologiques ont été sélectionnés pour une validation finale où des essais de durabilité ont été entrepris.

À la fin du chapitre, des corrélations ont été établies entre les résultats trouvés à l'échelle des MBE avec ceux des bétons correspondants pour estimer les avantages et les limites de la méthode MBE.

8.2 OPTIMISATION MULTIPARAMÉTRIQUE

Un grand nombre de mélanges ternaires a été testé sur MBE (8 combinaisons pour les MBE-AP et 12 combinaisons pour les MBE-SF où chaque combinaison contient au minimum 12 mélanges). De tous ces mélanges, quelques uns sont sélectionnés pour tester leurs performances sur béton. Pour se faire, le logiciel d'optimisation numérique inclus dans le logiciel Design-Expert a été utilisé. La première étape d'optimisation a été de fixer pour chaque combinaison l'objectif visé pour chaque critère de performance en attribuant un degré d'importance qui varie

de un (+) pour le moins important à cinq (+++++) pour le plus important. Par exemple, l'objectif du critère de la demande en SP est de minimiser cette demande avec une grande importance. Les différents critères d'optimisation ainsi que les mélanges ternaires résultants de l'optimisation des MBE-AP et des MBE-SF sont illustrés respectivement dans les tableaux 8.1 et 8.2. Les principaux objectifs de l'optimisation multiparamétrique sont l'obtention des résistances souhaitées à jeune âge et à 28 jours avec un remplacement maximal en poudre à faible réactivité, un remplacement minimal en poudre à réactivité élevée et une demande minimale en SP. Pour les MBE-AP et les MBE-SF, l'objectif visé par la viscosité plastique (μ_{pl}) dépend de la combinaison ternaire en question. Par exemple, les MBE-AP ternaires contenant les combinaisons L100 – FS (PC-AV2) et CC3 – FS (PC-AV2) ont présenté de faibles valeurs de μ_{pl} (figures 7.3-a et 7.3-b), ce qui signifie qu'il est plus judicieux de maximiser la valeur de μ_{pl} pour ces combinaisons. Par ailleurs, afin d'éviter d'avoir des BSF trop collants, il était essentiel de viser à minimiser la μ_{pl} dans les critères d'optimisation des combinaisons ternaires L120 – MK (PNS) et L120 – MK (PC) vu que ces derniers ont présenté des μ_{pl} très importantes.

Tableau 8.1 Critères et résultats de l'optimisation multiparamétrique des MBE-AP

Critère	Objectif	Importance	Résultats de l'optimisation numérique
Poudre à faible réactivité	Maximiser	+++	1) 40% CV-F + 2% FS (PC-AV2) 2) 30% CC3 + 2% FS (PNS-AV1) 3) 30% CC3 + 2% FS (PC-AV2) 4) 35% L100 + 2% FS (PNS-AV1) 5) 50% L100 + 2% FS (PC-AV2)
Poudre à réactivité élevée	Minimiser	+++	
Demande en SP	Minimiser	+++++	
μ_{pl}	Maximiser* Dans le domaine**	+++	
f'_c	$f'_{c1} = 6 \text{ MPa}$ $f'_{c28} = 40 \text{ MPa}$	+++++ +++++	

* Pour les MBE-AP ternaires en présence du couple PC-AV2 à cause des faibles μ_{pl} de ces systèmes.

** Pour les MBE-AP ternaires en présence du couple PNS-AV1.

Tableau 8.2 Critères et résultats de l'optimisation multiparamétrique des MBE-SF

Critère	Objectif	Importance	Résultats de l'optimisation numérique
Poudre à faible réactivité	Maximum	+++	1) 30% CV-F + 4% FS (PNS) 2) 40% CV-F + 4% FS (PC) 3) 25% CV-F + 6% MK (PNS) 4) 25% CV-F + 5% MK (PC) 5) 20% CV-C + 4% FS (PNS) 6) 30% CV-C + 4% FS (PC) 7) 25% CV-C + 4% MK (PNS) 8) 20% CV-C + 4% MK (PC) 9) 50 L120 + 4% FS (PNS) 10) 50% L120 + 4% FS (PC) 11) 35% L120 + 4% MK (PNS) 12) 50% L120 + 4,6% MK(PC)
Poudre à réactivité élevée	Minimum	+++	
Demande en SP	Minimum	+++++	
μ_{pl}	Minimum* Dans le domaine**	+++	
f'_c	1 j = 8 MPa 28 j = 55 MPa	+++++ +++++	

* Pour les combinaisons ternaires L120 – MK (PNS) et L120 – MK (PC) à cause des μ_{pl} très élevées.

** Pour le reste des combinaisons ternaires.

Les résultats de l'optimisation multiparamétrique ont donné cinq mélanges ternaires à valider sur BAP et douze mélanges ternaires pour les BSF. Parmi les mélanges ternaires destinés pour les BAP, il figure deux mélanges (30% CC3 + 2% FS (PC-AV2) et 50% L100 + 2% FS (PC-AV2)) dont les μ_{pl} de ces MBE-AP sont de l'ordre de 1,2 Pa.s. Il était important de vérifier la stabilité statistique de ces MBE-AP avant de procéder à la validation sur béton. Pour ce faire, le test de la colonne de conductivité électrique à 10 paires d'électrodes a été utilisé pour ces deux MBE-AP. La description de ce test a été détaillée dans le chapitre 3 (section 3.3.2).

La figure 8.1 représente les résultats de l'indice de stabilité de ces deux MBE-AP en fonction du temps. Cet indice donne une idée du degré de variation dans la lecture de la conductivité électrique entre les 10 paires électrodes qui ne doit pas dépasser 96% du domaine de confiance pour assurer une bonne stabilité du milieu cimentaire. La figure 8.1 montre bien que la conductivité électrique du MBE-AP contenant 30% CC3 + 2% FS (PC-AV2) est quasiment pareille entre les dix paires d'électrodes alors qu'avec le mélange 50% L100 + 2% FS (PC-AV2) l'indice de stabilité se trouve à la limite préconisée par le test (96%). Ces deux mélanges ont été

maintenus pour la validation sur béton où la stabilité à l'échelle du BAP a été évidemment vérifiée avec le test de la colonne de ségrégation.

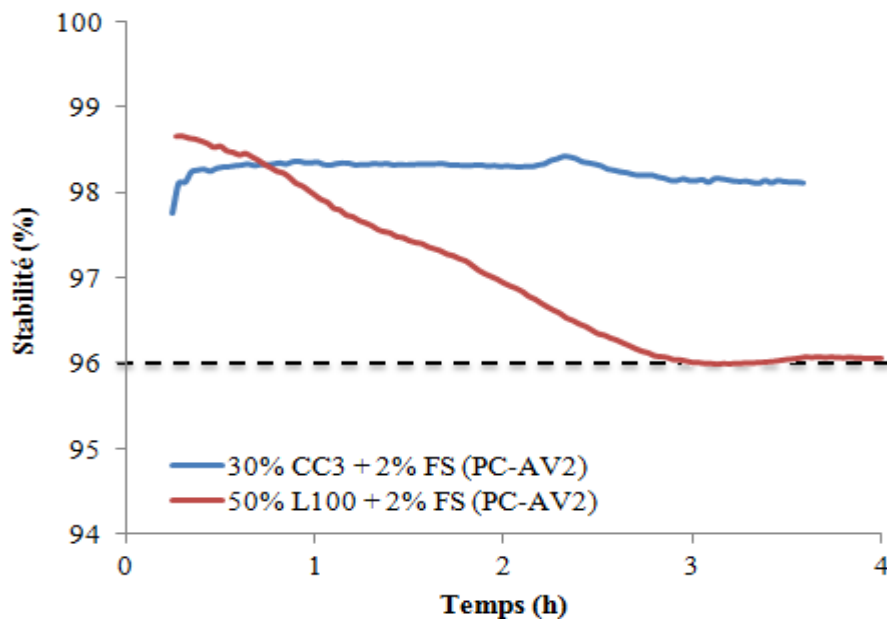


Figure 8.1 Indice de stabilité des MBE-AP obtenu par l'essai de la colonne de conductivité électrique

8.3 VALIDATION DES CIMENTS TERNAIRES SUR BAP POUR CONSTRUCTION DE BÂTIMENTS

La composition des cinq BAP ternaires qui ont été sélectionnés pour la validation ainsi que les deux BAP de référence (BAP-REF1 (PNS-AV1) et BAP-REF2 (PC-AV2)) et les bétons témoins (T1 (PNS) et T2 (PC)) est représentée dans le tableau 8.3. Comme il a été déjà mentionné dans le chapitre 3, dans cette étude, les BAP destinés pour la construction des bâtiments sont des bétons sans air entraîné avec un rapport $E/P = 0,45$ et un dosage en poudre de 460 kg/m^3 . Les mélanges ternaires des poudres sont introduits par substitution de la masse de ciment. La demande en SP (PNS et PC) de ces BAP a été ajustée pour obtenir un étalement constant de $680 \pm 20 \text{ mm}$. Le dosage en AV a été maintenu constant pour tous les BAP ($2,5 \text{ l/m}^3$ pour AV1 et $0,92 \text{ l/m}^3$ pour AV2). Les bétons témoins sont des bétons conventionnels avec un dosage en ciment de 350 kg/m^3 et un rapport $E/C = 0,45$. Les quantités de SP (PNS et PC) ont été ajustées pour avoir un affaissement de 150 mm .

Les essais effectués pour la caractérisation de ces BAP à l'état frais et l'état durci sont récapitulés dans le tableau 3.5 avec une description détaillée de chaque essai dans la section 3.3.3.

Tableau 8.3 Composition des BAP validés (étalement 680 ± 20 mm)

	Ciment (kg/m ³)	Poudre à réactivité élevée (kg/m ³)	Poudre à faible réactivité (kg/m ³)	Eau (l/m ³)	SP (l/m ³)	AV (l/m ³)	Sable (kg/m ³)	Granulats 14 mm (kg/m ³)
BAP-REF1 (PNS-AV1)	460	0	0	202	5,5	2,50	740	940
BAP-REF2 (PC-AV2)	460	0	0	205	2,2	0,92	746	948
40% CV-F + 2% FS (PC-AV2)	267	184	9,2	205	2,1	0,92	722	917
30% CC3 + 2% FS (PNS-AV1)	313	138	9,2	202	4,4	2,50	732	930
30% CC3 + 2% FS (PC-AV2)	313	138	9,2	205	2,5	0,92	736	935
35% L100 + 2% FS (PNS-AV1)	290	161	9,2	203	3,6	2,50	736	935
50% L100 + 2% FS (PC-AV2)	221	230	9,2	205	2,0	0,92	738	938
T1 (PNS)	350	0	0	157	3,0	-	793	1140
T2 (PC)	350	0	0	159	0,8	-	793	1140

8.3.1 Propriétés des BAP validés à l'état frais

Les propriétés à l'état frais des BAP de référence et des cinq BAP validés sont représentées dans le tableau 8.4. Les mesures d'étalement, t_{50} , étalement à travers J-ring (16 barres), masse volumique, teneur en air, τ_0 et μ_{pl} ont été poursuivis jusqu'à 90 min. La stabilité statique des mélanges a été évaluée par l'essai de la colonne de ségrégation.

À 10 min, la capacité de remplissage des différents BAP a été assurée par l'étalement initial constant de 680 ± 20 mm. Cet étalement a donné des valeurs très proches du τ_0 de l'ordre de 60 ± 4 Pa, mesuré par le ConTec 5. Les différents BAP ont aussi manifesté initialement une bonne résistance au blocage où la différence entre l'étalement sans et avec le J-Ring pour tous les BAP était comprise entre 10 et 25 mm. À 90 min, cette différence s'est creusée pour atteindre 25 à 40 mm, ce qui correspond à un niveau de blocage minimal à important (tableau 3.6). Par ailleurs, un bon maintien de la fluidité a été noté pour tous les BAP où l'étalement le plus faible a été obtenu

Tableau 8.4 Composition des BAP validés

Propriétés à l'état frais		Temps (min)	BAP-REF1 (PNS-AV1)	BAP-REF2 (PC-AV2)	40% CV-F + 2% FS (PC-AV2)	30% CC3 + 2% FS (PNS-AV1)	30% CC3 + 2% FS (PC-AV2)	35% L100 + 2% FS (PNS-AV1)	50% L100 + 2% FS (PC-AV2)
SP (% sec/poudre)		1	0,600	0,205	0,200	0,473	0,232	0,394	0,180
Température (°C)		10	21,3	21,9	21,8	21,5	20,9	21,0	21,2
		90	20,3	20,6	20,6	19,8	19,8	20,0	19,7
Masse volumique		10	2341	2375	2357	2340	2359	2341	2369
		60	2362	2385	2366	2376	2369	2371	2376
		90	2367	2381	2385	2386	2387	2375	2384
Air (%)		10	1,8	1,7	0,8	1,3	1,0	1,2	0,9
		60	1,4	1,5	0,8	1,0	0,9	0,9	0,9
		90	1,4	1,5	0,8	0,9	0,9	0,9	0,8
Étalement (mm) / t ₅₀ (sec)		10	690 / 2,81	660 / 1,69	660 / 1,97	675 / 2,31	680 / 1,87	670 / 2,66	680 / 1,72
		30	660 / 2,75	620 / 2,12	650 / 2,19	650 / 2,69	660 / 1,50	670 / 3,00	680 / 1,76
		60	650 / 2,60	600 / 2,18	630 / 2,31	610 / 2,93	660 / ,87	620 / 3,00	670 / 1,76
		90	630 / 3,03	585 / 2,30	620 / 2,30	525 / 5,00	650 / ,40	530 / 6,60	660 / 2,11
J-Ring (mm)	Φ_{Jring}	10	660	640	650	650	670	650	660
	$\Delta\Phi$		15	20	10	25	10	20	20
	Φ_{Jring}	30	630	580	620	610	650	630	660
	$\Delta\Phi$		20	30	30	40	10	40	20
	Φ_{Jring}	60	640	565	590	560	635	565	650
	$\Delta\Phi$		20	35	35	-	25	55	20
	Φ_{Jring}	90	580	560	560	430	620	500	620
	$\Delta\Phi$		25	25	40	-	40	30	40
Stabilité (%)	S ^(*)	15	8,6	5,6	10,3	10,1	11,6	6,1	12,0
	C.O.V.		3,8	1,6	2,6	3,1	2,7	0,5	4,0
τ_0 (Pa)		10	60	63	64	59	61	58	56
		60	67	77	79	78	80	84	68
		90	74	83	83	107	90	109	69
μ_{pl} (Pa.s)		10	24	17	11	15	12	22	13
		60	22	15	12	21	12	26	15
		90	25	21	13	23	12	27	16
Thixotropie, PV τ_{0repos} (Pa/min)		-	10 Faible	12 Faible	4 Faible	11 Faible	6 Faible	11 Faible	6 Faible

(*) Indice de ségrégation

avec le BAP contenant 30% CC3 + 2% FS (PNS-AV1) avec un diamètre moyen de 525 mm. Par contre, le BAP contenant 50% L100 + 2% FS (PC-AV2) a présenté le meilleur maintien d'étalement à 90 min avec un diamètre moyen de 660 mm.

La μ_{pl} des BAP validés dépend principalement du couple SP-AV utilisé et moins du mélange ternaire en question. En effet, les BAP en présence du couple PNS-AV1 sont plus visqueux de 1,25 à 1,70 fois que ceux en présence du couple PC-AV2. Par ailleurs, en présence du couple (PNS-AV1), le mélange ternaire 35% L100 + 2% FS a donné un BAP plus visqueux de 1,5 fois que celui qui contient 30% CC3 + 2% FS. Avec le temps, μ_{pl} des différents BAP a augmenté mais de façon moins importante que le τ_0 où ce dernier a manifesté des augmentations allant jusqu'à 80% avec les BAP contenant 30% CC3 + 2% FS ou 35% L100 + 2% FS, les deux en présence de PNS-AV1.

Les résultats de la stabilité des BAP validés sont résumés dans le tableau 8.4. Tous les BAP ont présenté un indice de stabilité inférieur à la limite préconisée par le test de 15% avec un C.O.V. qui ne dépasse pas 4%. Le BAP contenant 35% L100 + 2% FS (PNS-AV1) a présenté la meilleure stabilité avec un indice de ségrégation de 6% et un C.O.V de 0,5%.

La thixotropie a été aussi mesurée pour les différents BAP validés moyennant l'essai des palettes portatives. Selon la classification de la thixotropie avec les palettes portatives du tableau 3.9, tous les BAP validés ont exposé un faible degré de restructuration avec des indices de thixotropie compris entre 4 à 12 Pa/min (tableau 8.4).

8.3.2 Propriétés mécaniques des BAP validés

Le développement des f'_c a été mesuré à 1, 28, 56 et 91 jours. Les résultats sont résumés dans le tableau 8.5 et représentés sur la figure 8.2. Il est remarqué que les BAP contenant les mélanges ternaires 40% CV-F + 2% FS (PC-AV2) et 50% L100 + 2% FS (PC-AV2) ont présenté des f'_{c1} limites avec une valeur de 6 MPa. Cependant, les f'_c des autres BAP sont tous supérieures à 10 MPa. Les f'_{c28} obtenues dépassent les attentes prévues avec des valeurs au-delà de 40 MPa. Les deux BAP qui ont donné les plus faibles f'_{c28} sont ceux qui contiennent 30% CC3 + 2% FS (PNS-AV1 et PC-AV2) avec des valeurs de l'ordre de 35 MPa. Les BAP contenant 30% L100 + 2% FS (PNS-AV1) et 50% L100 + 2% FS (PC-AV2) ont donné la meilleure performance en terme de f'_c .

qui sont les plus élevée à 28, 56 et 91 jours en comparaison avec le reste des BAP validés où les f'_{c91} ont même dépassé 60 MPa.

Tableau 8.5 Résistances à la compression et retrait de séchage des BAP validés

	f'_c (MPa)				ϵ_{s287}^* ($\mu\text{m/m}$)
	f'_{c1}	f'_{c28}	f'_{c56}	f'_{c91}	
T1 (PNS)	19	40	43	55	477
T2 (PC)	17	42	43	54	403
BAP-REF1(PNS-AV1)	16	45	47	51	686
BAP-REF2(PC-AV2)	16	47	51	54	569
40% CV-F + 2% FS (PC-AV2)	6	39	50	52	559
30% CC3 + 2% FS (PNS-AV1)	14	36	39	41	580
30% CC3 + 2% FS (PC-AV2)	11	34	37	38	470
35% L100 + 2% FS (PNS-AV1)	11	52	54	63	519
50% L100 + 2% FS (PC-AV2)	6	46	53	63	525

* le retrait de séchage a été suivi jusqu'à 287 jours

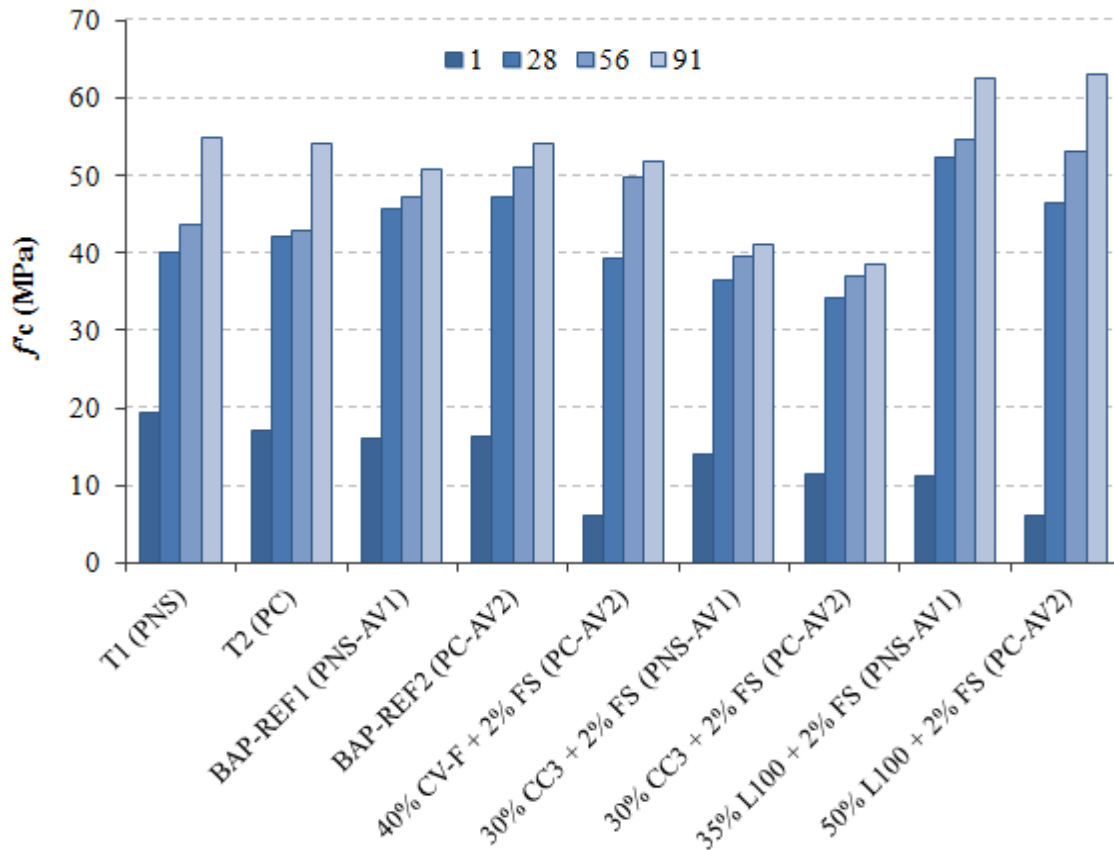


Figure 8.2 Résistances à la compression des BAP validés à 287 jours

8.3.3 Retrait de séchage des BAP validés

Le retrait de séchage (ϵ_s) des BAP validés a été suivi jusqu'à 41 semaines jours. Les résultats sont illustrés sur la figure 8.3 et les valeurs finales du retrait figurent sur le tableau 8.5. À cause de leur faible teneur en ciment et en eau, le ϵ_s des bétons témoins T1 (PNS) et T2 (PC) est inférieur à celui des bétons références BAP-REF1 (PNS-AV1) et BAP-REF2 (PC-AV2). L'effet des ciments ternaires sur le ϵ_s des bétons est un peu partagé. Dans cette étude, les résultats indiquent que les mélanges ternaires peuvent avoir un effet bénéfique sur le ϵ_s . En effet, les mélanges ternaires 30% CC3 + 2% FS et 35% L100 + 2% FS ont contribué à réduire ce ϵ_s de 15% et 24% en présence de PNS-AV1, par rapport au BAP-REF1. En présence de PC-AV2, une réduction de 17% a été notée avec 30% CC3 + 2% FS par rapport au BAP-REF2. Par contre, une différence mineure non significative a été notée entre le ϵ_s des mélanges ternaires 40% CV-F + 2% FS (PC-AV2) et 50% L100 + 2% FS (PC-AV2) et celui du BAP-REF2. Khatri et coll. [1995] indiquent que l'addition des AM tels que la FS et le laitier contribuent à raffiner la taille des pores distribués, ce qui peut réduire la perte d'eau et par conséquent une diminution ϵ_s . Par ailleurs, il a été constaté que le ϵ_s des BAP en présence du couple PC-AV2 est 17% moins important que celui des BAP en présence de PNS-AV1.

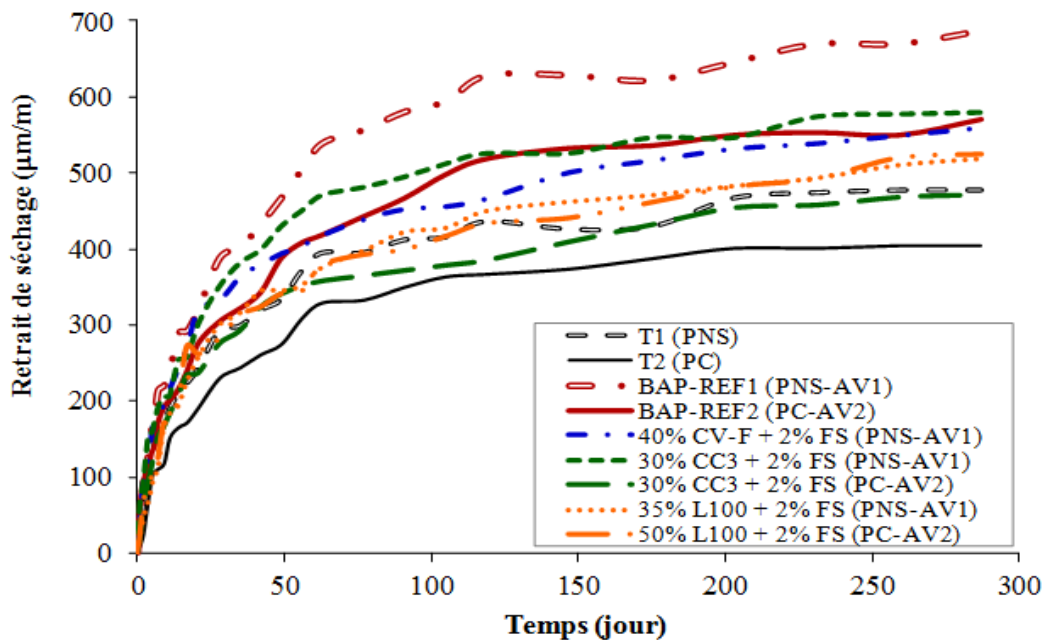


Figure 8.3 Retrait de séchage des BAP validés

8.3.4 Synthèse

Les résultats ci-haut montrent que les différents mélanges ternaires obtenus par l'optimisation multiparamétrique sur MBE ont donné des BAP avec des propriétés convenables à l'état frais et à l'état durci. La comparaison à ces deux états des résultats de tous les BAP validés conclut que le BAP qui contient 35% L100 + 2% FS (PNS-AV1) s'avère le mélange qui a présenté la meilleure performance dont les f'_c ont dépassé 50 MPa et avec une baisse dans le ε_s , mesuré à 287 jours, de 24% par rapport au mélange de référence.

Pour compléter cette synthèse, il a été jugé utile d'évaluer à titre indicatif la contribution des différents mélanges ternaires dans la diminution des émissions en CO₂. Pour cela, le programme "Concrete Carbon Calculator" disponible sur internet a été utilisé pour estimer la quantité de CO₂ émise à partir de la composition du béton.

Les quantités de CO₂ calculées pour les cinq BAP validés ont été normalisées par rapport aux mélanges références respectifs. Les résultats sont représentés en fonction du coût qui était à son tour normalisé par MPa par rapport au mélange de référence (figure 8.4). Il est évident que l'augmentation du pourcentage de remplacement du ciment affecte considérablement la quantité de CO₂ émise. Un remplacement de 10% de ciment par des AM peut diminuer jusqu'à 7,8% la quantité de CO₂ émise, sans évoquer l'avantage économique qui peut s'avérer intéressant. En effet, les BAP qui contiennent 35% L100 + 2% FS (PNS-AV1) et 40% CV-F + 2% FS (PC-AV2) ont produit des diminutions respectives de CO₂ de 33% et 38% par rapport au mélange de référence avec une diminution de 20% et 10% du coût de 1 MPa par rapport au mélange de référence.

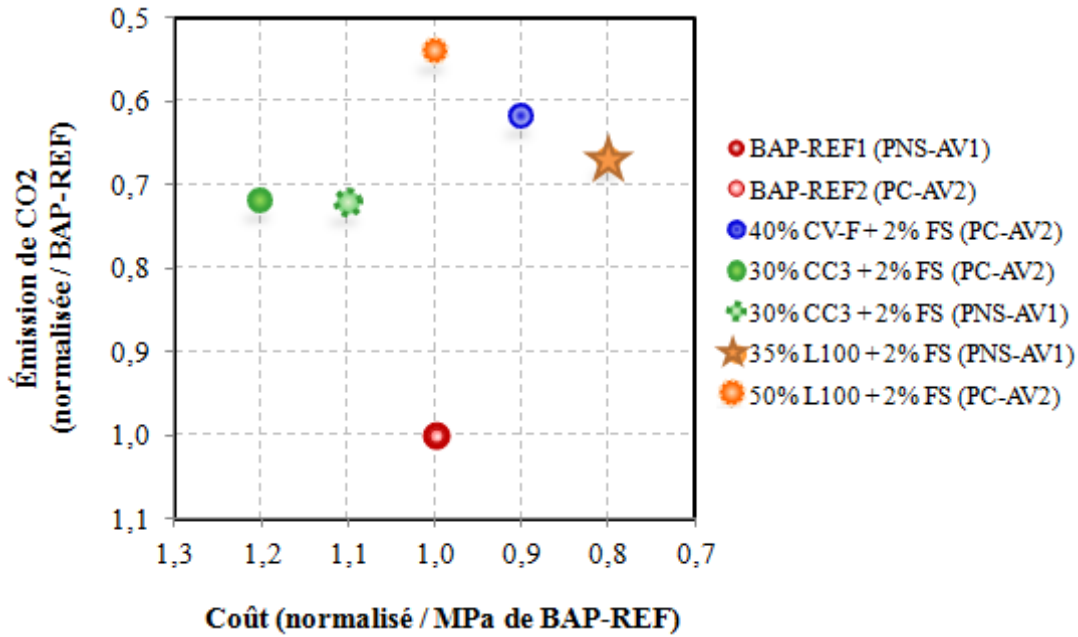


Figure 8.4 Quantité de CO₂ émise par les BAP validés en fonction du coût par MPa par rapport aux mélanges de référence

8.4 VALIDATION DES CIMENTS TERNAIRES SUR BSF POUR INFRASTRUCTURES DE TRANSPORT

La validation sur BSF a été effectuée sur deux étapes. La première étape consistait à une pré-validation des douze mélanges ternaires obtenus de l'optimisation multiparamétrique (tableau 8.2) où il était question de valider les propriétés à l'état frais, f'_c et de mesurer le ε_s de ces mélanges. Par la suite, quatre mélanges présentant les meilleures performances ont été choisis pour valider leur durabilité dans une deuxième étape. La composition des douze BSF ternaires qui ont été sélectionnés pour la pré-validation avec les deux mélanges de référence (BSF-REF1 (PNS) et BSF-REF 2 (PC)) est représentée sur le tableau 8.6 et 8.7 en présence de PNS et PC, respectivement.

Dans cette partie d'étude, les BSF sont destinés aux infrastructures de transport. Ces bétons ont été conçus avec un rapport E/P = 0,41 et un dosage en poudre de 400 kg/m³. Les poudres dans les mélanges ternaires ont été introduites par substitution massique du ciment. La demande en SP (PNS et PC) de ces BSF a été ajustée pour avoir une consistance semi-fluide avec un étalement constant de 550 ± 20 mm. Bien que la phase sur MBE a été effectuée sans air entraîné pour

Tableau 8.6 Composition des BSF (PNS-AEA1) pré-validés (étalement 550 ± 20 mm)

	Ciment (kg/m ³)	Poudre à réactivité élevée (kg/m ³)	Poudre à faible réactivité (kg/m ³)	Eau (l/m ³)	SP (PNS) (l/m ³)	AEA1 (l/m ³)	Sable (kg/m ³)	Granulat 14 mm (kg/m ³)
BSF-REF1 (PNS-AEA1)	400	0	0	161	4,0	0,100	857	891
30% CV-F + 4% FS (PNS)	264	120	16	160	5,0	0,103	836	869
25% CV-F + 6% MK (PNS)	276	100	24	160	5,4	0,090	839	872
20% CV-C + 4% FS (PNS)	304	80	16	161	4,4	0,105	838	871
25% CV-C + 4% MK (PNS)	284	100	16	161	3,9	0,090	836	869
50% L120 + 4% FS (PNS)	184	200	16	161	4,1	0,070	848	881
35% L120 + 4% MK (PNS)	244	140	16	161	4,0	0,045	851	885

Tableau 8.7 Composition des BSF (PC-AEA2) pré-validés (étalement 550 ± 20 mm)

	Ciment (kg/m ³)	Poudre à réactivité élevée (kg/m ³)	Poudre à faible réactivité (kg/m ³)	Eau (l/m ³)	SP (PC) (l/m ³)	AEA2 (l/m ³)	Sable (kg/m ³)	Granulat 14 mm (kg/m ³)
BSF-REF2 (PC)	400	0	0	163	1,3	0,023	874	908
40% CV-F + 4% FS (PC)	224	160	16	163	1,8	0,060	848	882
25% CV-F + 5% MK (PC)	280	100	20	163	1,5	0,040	858	892
30% CV-C + 4% FS (PC)	264	120	16	163	1,3	0,056	848	881
20% CV-C + 4% MK (PC)	304	80	16	163	1,2	0,040	857	891
50% L120 + 4% FS (PC)	184	100	16	163	1,3	0,033	865	899
50% L120 + 4,5% MK (PC)	182	200	18	163	1,1	0,020	866	900

éliminer l'effet de l'air sur les propriétés rhéologiques, il était nécessaire que les BSF pré-validés et validés soient conçus avec air entraîné vu que des tests de durabilité s'imposent pour ce type d'application. Pour chaque BSF, le dosage d'un agent entraîneur d'air (AEA1 et AEA2) compatible avec chaque SP (PNS et PC) a été ajusté pour avoir un pourcentage d'air dans les bétons compris entre 5% et 7%.

Les différents essais de caractérisation des BSF effectués aux états frais et durci sont récapitulés dans le tableau 3.5. Il est à noter qu'une description détaillée de ces essais est présentée dans la section 3.3.3.

8.4.1 Propriétés des BSF pré-validés à l'état frais

Pour une caractérisation adéquate des BSF à l'état frais, Leclerc [2010] et [Sotomayor Cruz, 2012] recommandent d'utiliser un certain nombre de tests avec un protocole d'échantillonnage bien spécifié qui figure dans le tableau 3.10. Parmi les recommandations mentionnées et afin d'évaluer la facilité de passage des BSF, il est plus propice d'utiliser 8 barres d'armatures pour le J-Ring (au lieu de 16 barres) et une à deux barres pour le L-Box (au lieu de 3 barres).

Par ailleurs, les mesures de l'étalement, t_{40} , la teneur en air, τ_0 et μ_{pl} ont été effectués à 10 et 70 min, où à ce dernier temps, la quantité de SP a été ajustée pour obtenir de nouveau l'étalement de 550 ± 20 mm. Les résultats des propriétés à l'état frais des BSF en présence de PNS et PC sont représentés sur les tableaux 8.8 et 8.9, respectivement.

À 10 min du contact eau-poudre, l'étalement constant des BSF de 550 ± 20 mm a donné des τ_0 légèrement plus dispersés par rapport aux BAP, avec des valeurs d'ordre de 88 ± 11 Pa. Les μ_{pl} des BSF dépendent du type de la combinaison ternaire où les μ_{pl} les plus faibles ont été obtenues avec 20% CV-C + 4% FS (PNS) et 30% CV-C + 4% FS (PC) dont les valeurs respectives sont de 20 et 25 Pa.s. Par contre, les BSF contenant 35% L120 + 4% MK (PNS) et 50% L120 + 4,5% MK (PC) se sont caractérisés par des μ_{pl} les plus élevées. Leurs valeurs respectives sont 55 et 54 Pa.s, contre des μ_{pl} des BSF de référence de 43 et 36 Pa.s en présence de PNS et PC, respectivement. Il faut mentionner que la teneur en air de tous les BSF était comprise entre 5 à 6 %, ce qui limite l'effet de l'air sur la μ_{pl} des BSF.

Tableau 8.8 Composition des BSF (PNS) pré-validés

Propriétés à l'état frais	Temps (min)	BSF-REF1	30% CV-F + 4% FS (PNS)	25% CV-F + 6% MK (PNS)	20%CV-C + 4% FS (PNS)	25% CV-C + 4% MK (PNS)	50% L120 + 4% FS (PNS)	35% L120 + 4% MK (PNS)
SP (% sec/poudres)	Initial	0,506	0,635	0,578	0,503	0,438	0,567	0,500
	70 ⁽¹⁾	0,054	0,079	0,055	0,053	0,054	0,060	0,059
Masse volumique	10	2273	2302	2293	2295	2286	2286	2295
	70 ⁽¹⁾	2306	2318	2331	2339	2308	2321	2335
Air (%)	10	5,5	5,5	6,0	5,0	5,6	6,0	5,0
	70 ⁽¹⁾	5,5	5,3	5,3	4,8	5,1	5,3	4,8
Étalement (mm) / t _{40étalement} (sec)	10	580/2,09	550/1,60	580/1,81	550/1,54	530/1,82	575/1,64	570/2,34
	60	350	385	370	380	340	-	340
	70 ⁽¹⁾	520/2,22	575/1,48	525/1,93	520/1,31	520/1,65	580/1,61	530/2,69
J-Ring (mm)	Φ_{Jring}	10	560	570	530	510	530	540
			20	20	20	20	45	30
	$\Delta\Phi$	70	500	510	500	500	535	500
			20	15	20	20	45	30
L-Box	R ⁽²⁾ (%)	10	95	93	100	87	83	82
	t _{40 L-Box} (sec)		-	-	1,31	2,32	1,65	2,66
Stabilité (%)	S ^(*)	15	1	3	5	3	5	1
	C.O.V.		1,1	0,9	3,6	1,8	0,6	2,8
Seuil de cisaillement (Pa)	10	72	79	76	95	98	80	87
	70 ⁽¹⁾	88	72	90	100	104	73	106
Viscosité plastique (Pa.s)	10	43	26	46	20	38	33	55
	70 ⁽¹⁾	40	28	42	22	33	32	58
Thixotropie PV τ_{0repos} (Pa/min)		52 Moyenne	12 Faible	32 Moyenne	30 Moyenne	32 Moyenne	59 Moyenne-élevée	54 Moyenne-élevée

⁽¹⁾ quantité de SP ajouté à 70 min pour avoir de nouveau un étalement de 550 ± 20 mm; ⁽²⁾ capacité de passage au L-Box mesurée après application de 5 sec de vibration; (-) : mesure manquée; (*) Indice de ségrégation; Les colonnes "en gras" sont les mélanges sélectionnés pour **la validation finale**.

Tableau 8.9 Composition des BSF (PC) pré-validés

Propriétés à l'état frais		Temps (min)	BSF-REF2 (PC)	40% CV-F + 4% FS (PC)	25% CV-F + 5% MK (PC)	30% CV-C + 4% FS (PC)	20% CV-C + 4% MK (PC)	50% L120 + 4% FS (PC)	50% L120 + 4,5% MK (PC)
SP (% sec/poudres)		Initial	0,138	0,188	0,158	0,138	0,130	0,137	0,123
		70 ⁽¹⁾	0,006	0,006	0,015	0,012	0,025	0,010	0,020
Masse volumique		10	2324	2292	2314	2253	2291	2289	2272
		70 ⁽¹⁾	2310	2290	2321	2277	2317	2287	2295
Air (%)		10	5,5	5,5	4,9	5,9	4,9	5,8	5,5
		70 ⁽¹⁾	5,5	5,6	4,8	5,0	4,8	5,8	5,8
Étalement (mm) / t _{40étalement} (sec)		10	540/1,84	560/1,75	550/2,25	530/1,31	540/1,81	550/1,75	555/2,53
		60	460	490	370	400	350	380	340
		70 ⁽¹⁾	530/1,32	550/1,20	550/2,10	520/1,25	550/1,91	520/2,10	570/2,37
J-Ring (mm)	Φ _{Jring}	10	520	495	570	510	510	500	540
	ΔΦ _{J-Ring}		10	65	20	20	30	50	15
	Φ _{Jring}	70 ⁽¹⁾	515	520	500	500	490	490	550
	ΔΦ _{J-Ring}		15	30	50	20	60	30	20
L-Box	R ⁽²⁾ (%)	10	87	92	79	88	82	82	79
	t ₄₀ L-Box (sec)		-	1,75	2,72	-	1,81	1,75	3,00
Stabilité (%)	S ^(*)	15	1	2	2	5	2	5	1
	C.O.V.		-	1,8	3,0	2,8	0,5	3,0	1,1
Seuil de cisaillement (Pa)		10	86	77	79	92	88	83	80
		70 ⁽¹⁾	95	101	90	107	90	100	76
Viscosité plastique (Pa.s)		10	36	37	51	25	44	32	54
		70 ⁽¹⁾	38	35	46	22	44	33	50
Thixotropie PVτ _{0repos} (Pa/min)			40 Moyenne	4 Faible	4 Faible	4 Faible	5 Faible	124 Très élevée	204 Très élevée

⁽¹⁾ quantité de SP ajouté à 70 min pour avoir de nouveau un étalement de 550 ± 20 mm; ⁽²⁾ capacité de passage au L-Box mesurée après application de 5 sec de vibration; ^(*) Indice de ségrégation; (-) : mesure manquée; Les colonnes "en **gras**" sont les mélanges sélectionnés pour la **validation finale**.

Leclerc [2010] et [Sotomayor Cruz, 2012] recommandent dans leurs études que la mesure du $t_{40\text{étalement}}$ des BSF pour atteindre un étalement de 400 mm peut remplacer le t_{50} pour le BAP. Le $t_{40\text{étalement}}$ recommandé pour les BAP et les BSF est de 2 à 7 secondes pour avoir des viscosités appropriées et une bonne stabilité. Dans cette étude, les différents BSF pré-validés ont présenté des $t_{40\text{étalement}}$ compris entre 0,85 et 2,70 secondes. Ces valeurs sont faibles par rapport à ce qui est recommandé mais sans compromettre la stabilité des mélanges. En effet, tous les BSF ont présenté une stabilité statique très satisfaisante avec un indice de ségrégation inférieur à 5%.

La figure 8.5-a montre la relation entre la μ_{pl} des BSF et le $t_{40\text{étalement}}$ où une assez bonne corrélation est notée. Cependant, il est imprudent d'utiliser cette relation vu que le domaine des μ_{pl} des BSF obtenus est étroit. Un autre t_{40} a été mesuré à partir de l'essai de L-Box qui correspond au temps que le béton met pour atteindre la distance de 400 mm dans la partie horizontale de L-Box ($t_{40L\text{-Box}}$) où une bonne proportionnalité a été marquée entre les mesures des $t_{40\text{étalement}}$ et $t_{40L\text{-Box}}$ (figure 8.5-b).

Les essais de J-Ring et de L-Box ont permis d'évaluer la capacité au passage des BSF. Les résultats montrent que certains BSF ont manifesté un blocage lors de l'essai de J-Ring mais pas lors de l'essai de L-Box. En effet, les mélanges 50% L120 + 4% FS (PNS), 40% CV-F + 4% FS (PC), 20% CV-C + 4% MK (PC) et 50% L120 + 4% FS (PC) ont présenté un blocage avec des $\Delta\Phi_{J\text{-Ring}}$ supérieur à 45 mm. Toutefois, pour ces mêmes mélanges, l'application de 5 secondes de vibration lors de l'essai de L-Box était suffisante pour atteindre une excellente capacité de passage avec R supérieur à 80% (tableau 8.8 et 8.9).

La thixotropie des BSF a été testée de la même manière que les BAP, en utilisant l'essai de la vanne portative. Les BSF validés ont exposé différents degrés de thixotropie qui varie de la classe la plus faible (valeurs inférieures à 25 Pa/min) à très élevées (valeurs allant jusqu'à 200 Pa/min). Les bétons qui ont exposé le plus grand degré de restructuration sont ceux qui contiennent 50% L120 + 4% FS et 50% L120 + 4,5% MK en présence de PC (valeurs de 124 et 204 Pa/min, respectivement).

À 60 min, les BSF en présence de PNS ont présenté quasiment la même consistance avec un étalement de 360 ± 20 mm. Tandis que les BSF qui contiennent des mélanges ternaires avec la FS et en présence de PC ont donné de meilleures rétentions qui dépassent 400 mm. Ces bétons ont nécessité, à 70 min, deux fois moins de PC par rapport aux autres mélanges.

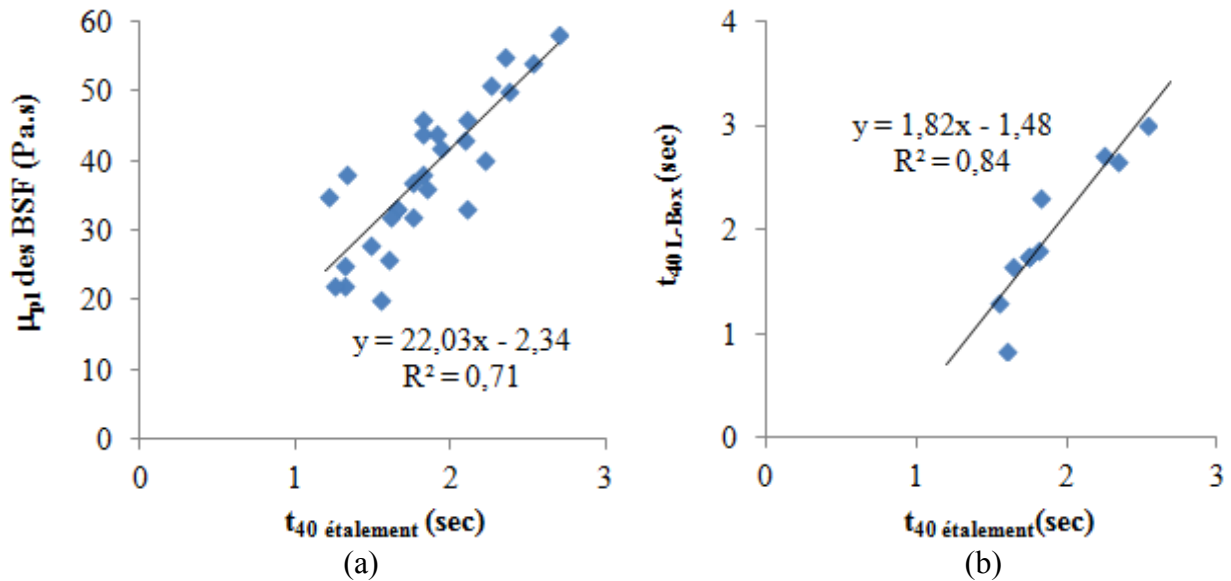


Figure 8.5 Corrélation entre (a) $t_{40\text{étalement}}$ et la μ_{pl} des BSF pré-validés;
(b) $t_{40\text{étalement}}$ et $t_{40L\text{-Box}}$

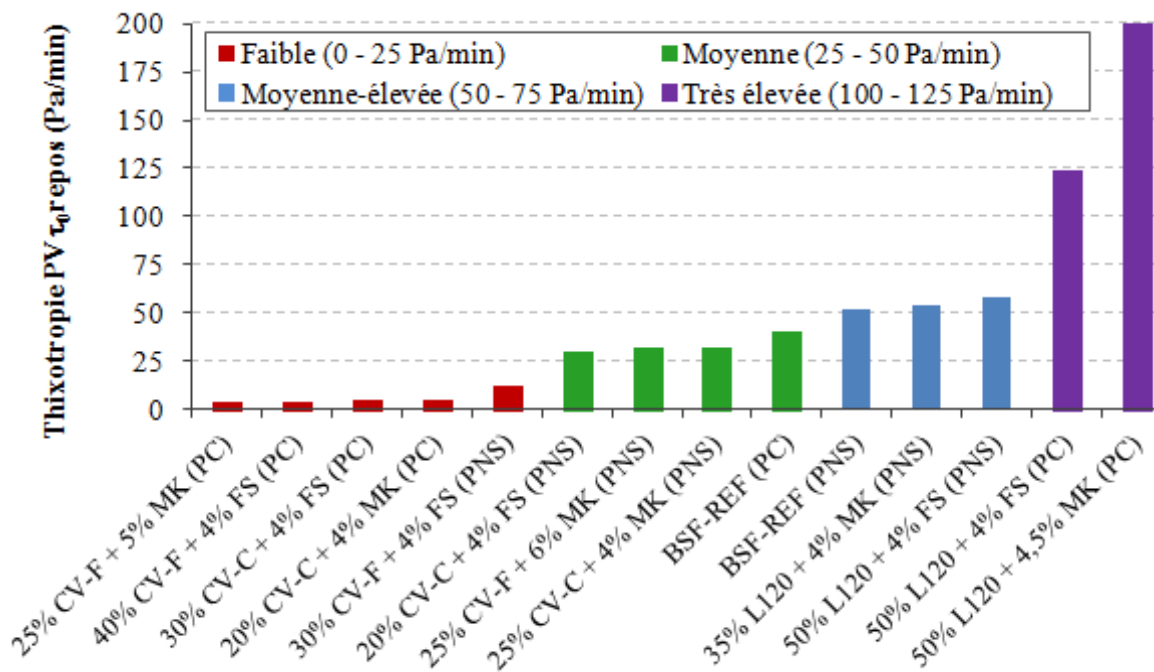


Figure 8.6 Classification de la thixotropie des BSF pré-validés

8.4.2 Propriétés mécaniques des BSF pré-validés

Les résultats du développement des f'_c à 1, 28, 56 et 91 jours sont résumés dans tableau 8.10 et représentés sur la figure 8.7. À 1 jour, les f'_c obtenues sont assez élevées pour l'ensemble des BSF avec des valeurs les plus faibles de 8 et 11 MPa pour les bétons contenant 50% L120 + 4% MK en présence de PNS et PC, respectivement. Les différents BSF pré-validés ont développé des $f'_{c28}, f'_{c56}, f'_{c91}$ assez proches avec des valeurs moyennes de 45 ± 6 MPa, 47 ± 5 MPa et 53 ± 6 MPa, respectivement. Une légère avance est constatée dans les f'_{c28} des BSF ternaires qui contiennent le L120 avec des valeurs supérieures à 45 MPa quel que soit le type de SP utilisé. Cependant, les BSF ternaires qui contiennent 25% CV-F + 5% MK (PC) et 25% CV-C + 4% MK (PNS) ont marqué les plus grands gains de f'_c entre 28 et 91 jours avec des augmentations de l'ordre de 23% et 34%, respectivement.

Tableau 8.10 Résistances à la compression des BSF pré-validés

		f'_c (MPa)				ϵ_{s120}^* ($\mu\text{m/m}$)
		f'_{c1}	f'_{c28}	f'_{c56}	f'_{c91}	
PNS	BSF-REF1 (PNS)	18,5	40	42	46	446
	30% CV-F + 4% FS (PNS)	14	38	41	46	396
	25% CV-F + 6% MK (PNS)	12	43	46	48	473
	20% CV-C + 4% FS (PNS)	15	43	46	51	437
	25% CV-C + 4% MK (PNS)	18	44	52	59	440
	50% L120 + 4% FS (PNS)	16	51	50	52	462
	35% L120 + 4% MK (PNS)	8	47	50	53	533
PC	BSF-REF2 (PC)	20	42	45	48	427
	40% CV-F + 4% FS (PC)	13	42	45	50	356
	25% CV-F + 5% MK (PC)	18	44	50	54	421
	30% CV-C + 4% FS (PC)	16	43	47	51	412
	20% CV-C + 4% MK (PC)	13	41	44	47	420
	50% L120 + 4% FS (PC)	13	47	50	52	440
	50% L120 + 4,5% MK (PC)	11	45	47	49	408

* ϵ_{s120} : retrait de séchage mesuré à 120 jours, Les lignes "en gras" correspondent aux mélanges sélectionnés pour la validation finale.

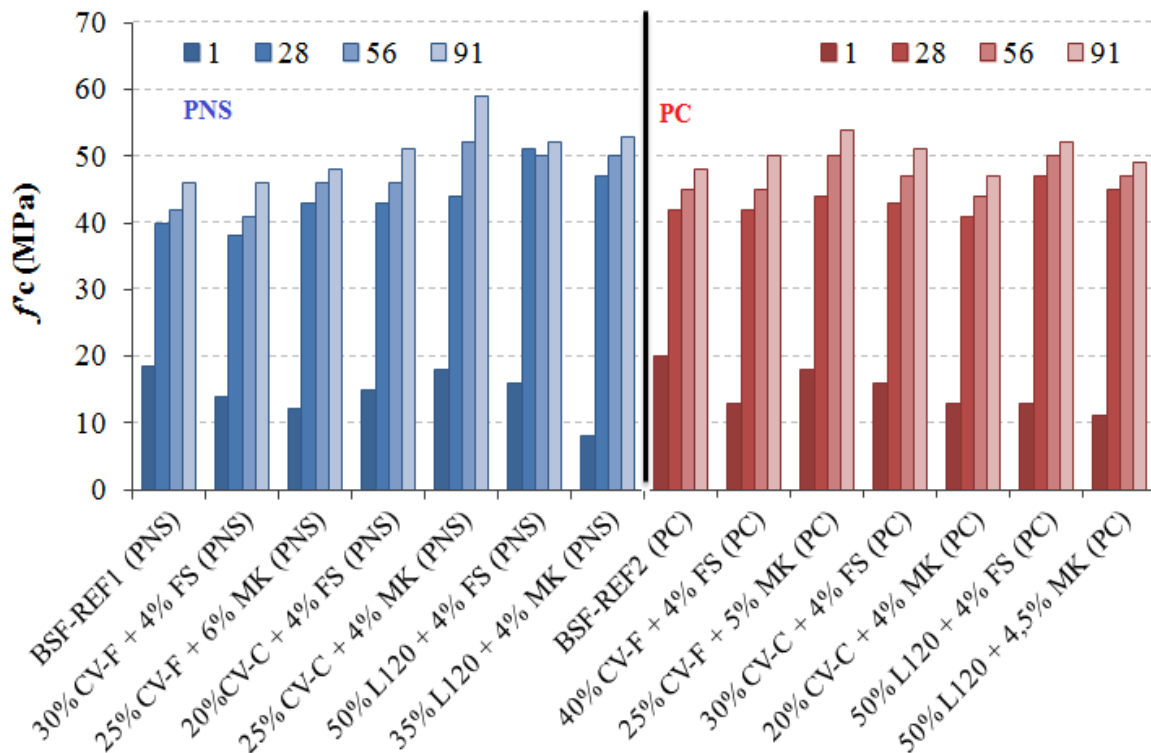


Figure 8.7 Résistances à la compression des BAP validés

8.4.3 Retrait de séchage des BSF pré-validés

Le retrait de séchage des BSF pré-validés a été suivi jusqu'à 120 jours. Les résultats sont représentés sur le tableau 8.10 et la figure 8.8. Les BSF ternaires en présence de PNS ont présenté des résultats de retrait assez proches avec des valeurs de $435 \pm 39 \mu\text{m/m}$, sauf pour le BSF contenant 35% L120 + 4% MK (PNS) qui a exposé une augmentation de 19% de retrait par rapport à BSF-REF1 (PNS), et qui correspond à une valeur de $533 \mu\text{m/m}$. Pareillement pour le retrait de séchage des BSF en présence du PC, des valeurs très serrées ont été obtenues de l'ordre de $417 \pm 9 \mu\text{m/m}$, sauf pour le mélange 40% CV-F + 4% FS (PC) qui a donné un retrait de $356 \mu\text{m/m}$, représentant une diminution de 17% par rapport à BSF-REF2 (PC).

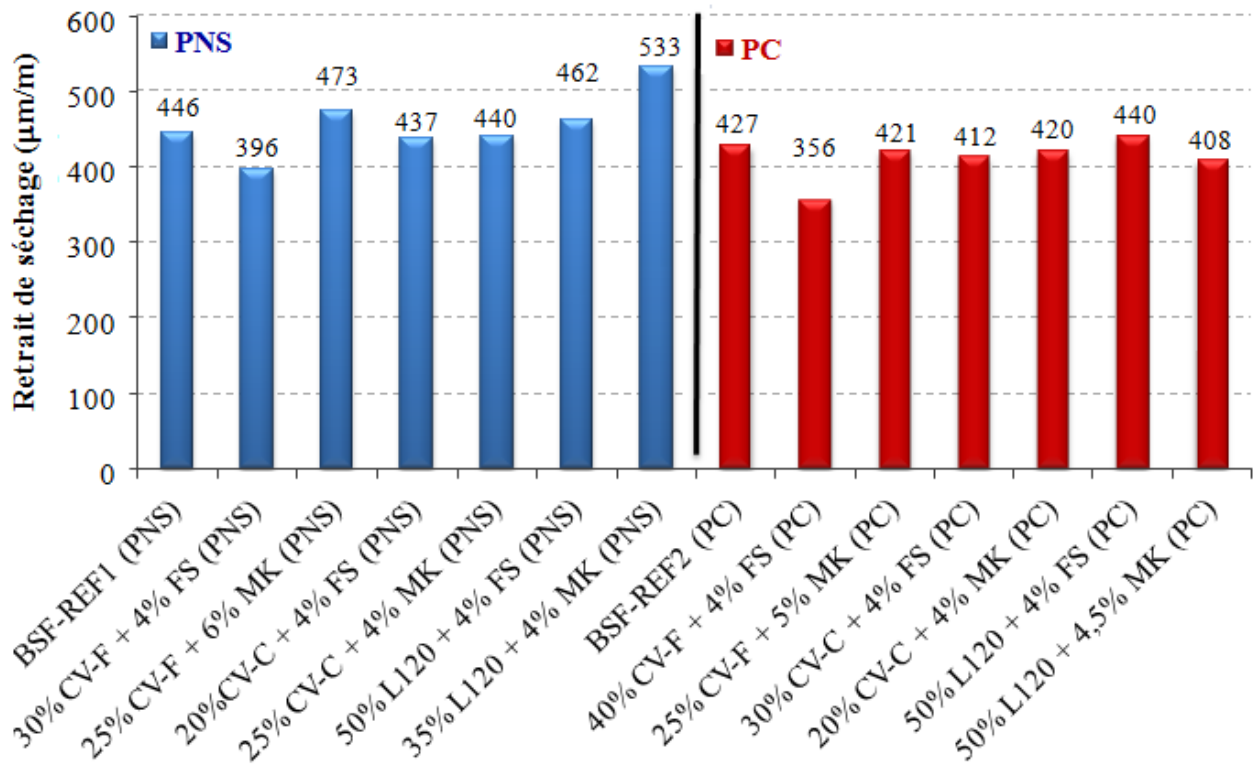


Figure 8.8 Retrait de séchage des BSF pré-validés à 120 jours

8.4.4 Synthèse

Les 12 mélanges ternaires obtenus par l'optimisation multiparamétrique numérique des MBE-SF ont été pré-validés sur BSF. Ces bétons ont présenté différentes propriétés rhéologiques avec des μ_{pl} variant de 20 à 55 Pa.s et ayant des degrés de thixotropie mesurée par les palettes portatives, s'étendant de faible à très élevée. Les f'_c et le ε_s de ces bétons étaient satisfaisantes et assez proches à ceux des BSF de référence. À partir de ces 12 mélanges, quatre mélanges présentant les meilleurs rapports performance/prix ont été choisis pour une validation finale afin d'évaluer la durabilité de ces bétons. Les BSF ternaires sélectionnés sont présentés sur la figure 8.9 où ils sont représentés par rapport aux autres mélanges pré-validés. Il apparaît clairement sur la figure 8.9 que les mélanges sélectionnés n'exposent pas forcément les plus faibles répercussions sur les émissions en CO_2 . Toute fois, ces bétons exposent les meilleurs développements de f'_c avec un minimum de retrait par rapport aux autres mélanges ternaires tout ayant différentes combinaisons ternaires et en présentant différentes propriétés rhéologiques. Les quatre mélanges sélectionnés figurent aussi sur les tableaux 8.8, 8.9 et 8.10 avec des caractères en gras. Les mélanges 30% CV-F + 4% FS (PNS)

et 30% CV-C + 4% FS (PC) se sont caractérisés par leurs μ_{pl} relativement faible avec une faible thixotropie. Par contre, les mélanges 25% CV-C + 4% MK (PNS) et 50% L120 + 4,5% MK (PC) se sont distingués, respectivement, par une μ_{pl} et une thixotropie moyenne et élevée par rapport aux autres mélanges.

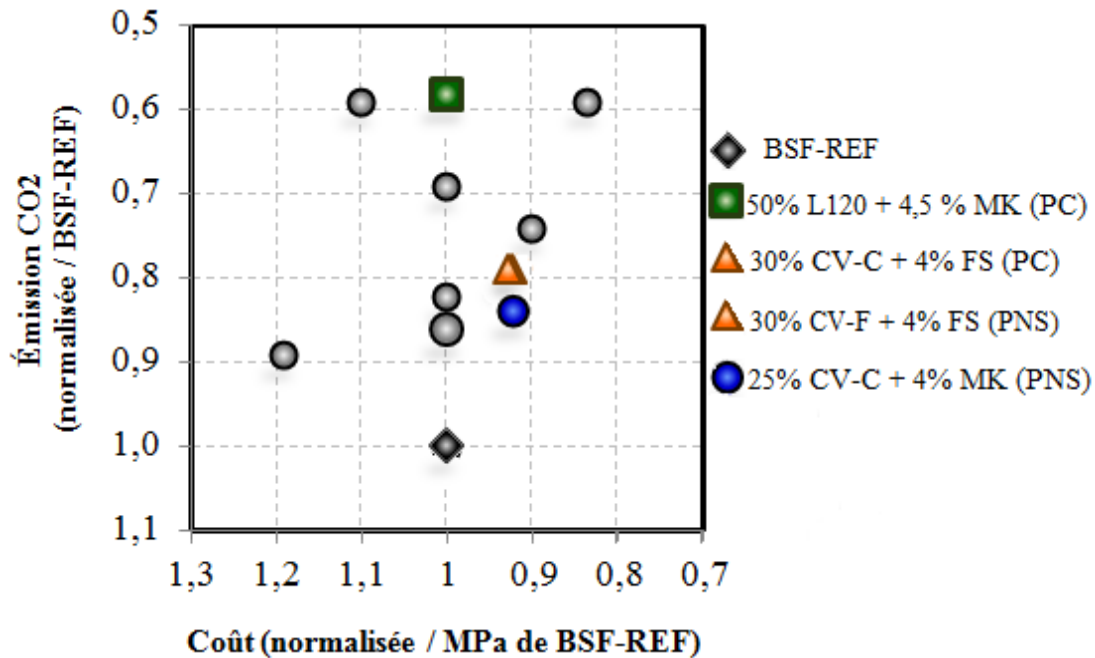


Figure 8.9 Quantité de CO₂ émise par les BSF validés en fonction du coût de 1MPa

8.4.5 Durabilité des BSF validés

Pour évaluer la durabilité des BSF validés, évidemment toutes les propriétés à l'état frais, les f'_c (1, 28 et 56 j) ainsi que le ε_s ont été mesurés une deuxième fois sauf l'essai de L-Box qui n'a pu être refait à cause des raisons liées à la planification. Les propriétés à l'état frais des bétons sont récapitulées dans le tableau 8.11 où quasiment tous les résultats obtenus dans la phase de pré-validation concordent très bien avec ces derniers résultats.

Pour tester la durabilité de ces bétons, les essais de perméabilité aux ions de chlorures, écaillage et gel-dégel ont été entrepris. Le protocole d'échantillonnage utilisé pour chacun de ces essais figure dans le tableau 3.10 et la description détaillée des tests se trouve dans le chapitre 3.

En plus des résultats des f'_c , ε_s et du module d'élasticité (E_c), le tableau 8.12 résume aussi les résultats des essais de durabilité des BSF ternaires validés. Le ε_s de ces bétons a été suivi jusqu'à 415 jours dont les valeurs sont de l'ordre de 560 ± 15 mm/m à l'exception du mélange 25% CV-C + 4% MK (PNS) qui a exhibé un ε_s de 669 $\mu\text{m/m}$. La comparaison entre les mesures de ε_s à 415 jours à celles prises à 120 jours montre que ces derniers constituent 60 à 73% des résultats finaux.

Tableau 8.11 Propriétés à l'état frais des BSF ternaires sélectionnés pour la validation finale

Propriétés à l'état frais	Temps (min)	30% CV-F + 4% FS (PNS)	25% CV-C + 4% MK (PNS)	30% CV-C + 4% FS (PC)	50% L120 + 4,5% MK (PC)
SP (% sec/poudres)	Initial	0,635	0,438	0,138	0,123
Masse volumique	10	2289	2279	2270	2242
Air (%)	10	6,2	6,1	6,2	5,9
Étalement (mm) / $t_{40\text{étalement}}$ (sec)	10	530/2,18	540/1,60	540/1,52	570/2,23
J-Ring (mm)	Φ_{Jring}	520	520	520	555
	$\Delta\Phi$	20	20	20	15
Stabilité	S^* (%)	3	4	5	1
	C.O.V (%)	2,3	1,6	2,7	0,93
τ_0 (Pa)	10	81	85	82	73
μ_{pl} (Pa.s)	10	32	40	24	56
Thixotropie (Pa/min)		10 Faible	38 Moyenne	9 Faible	200 Élevée

S : Indice de stabilité

Par ailleurs, le type du mélange ternaire n'a pas eu un effet significatif sur le M.E des BSF ternaires du fait que les quatre mélanges validés ont présenté tous un M.E de 35 ± 1 GPa.

L'essai de perméabilité aux ions de chlorures a été effectué après 28 jours de mûrissement. Les résultats indiquent que les mélanges validés ont tous exposé une très faible à faible perméabilité avec des valeurs qui n'excèdent pas 2000 Coulombs.

L'essai d'écaillage a été réalisé conformément à la norme ASTM C672. Les résultats de l'état de surface après 50 cycles de gel/dégel sont présentés sur le tableau 8.12. D'après l'examen visuel effectué par un même opérateur expert, tous les bétons ont exposé une classe d'écaillage entre 1 et 2, ce qui correspond à un écaillage très léger à léger modéré (tableau 3.12). Par contre, selon la norme québécoise BNQ 2621-900, la masse cumulative des résidus

après 56 cycles ne doit pas excéder 500 g/m². Par conséquent, le BSF contenant 25% CV-C + 4% MK (PC) a exposé visuellement une tendance légère à modérée à s'écailler au bout de 50 cycles mais la masse cumulative des résidus est considérablement supérieure à la limite susmentionnée (2057 g/m²). Les mélanges 30% CV-C + 4% FS (PC) et 50% L120 + 4,5% MK (PC) ont donné des masses de résidus très limites avec des valeurs de 449 et 503 g/m². Une faible masse (253 g/m²) de résidus a été obtenue pour le BSF fabriqué avec 30% CV-F + 4% FS (PNS) .

Le facteur de durabilité des BSF validés donnant une indication sur la résistance de ces bétons aux cycles de gel-dégel est représenté sur le tableau 8.12. Les résultats indiquent clairement qu'après 300 cycles de gel-dégel, les BSF validés ont exposé une excellente résistance au gel-dégel avec un facteur de durabilité minimal de 96%.

Tableau 8.12 Propriétés à l'état durci des BSF ternaires sélectionnés pour la validation finale

			30% CV-F + 4% FS (PNS) M3	25% CV-C + 4% MK (PNS) M1	30% CV-C + 4% FS (PC) M4	50% L120 + 4,5% MK (PC) M2
f'_c (MPa)	1 j		21	15	17	14
	28 j		47	41	45	52
	56 j		54	49	50	55
ϵ_s (µm/m)	120 j		420	470	420	430
	415 j		575	669	559	548
M.E ⁽¹⁾ (GPa)	56 j		34,1	35,5	33,5	36,8
KCl (Coulombs)	28 j		1174	1356	787	580
Écaillage	I.V. ⁽²⁾		1	2	1	1
	Résidu (g/m ²)	56 j	253	2057	449	503
Facteur de durabilité ⁽³⁾ (%)			100	96	97	96

⁽¹⁾ M.E : module d'élasticité; ⁽²⁾ I.V : indice visuel de la surface écaillée; ⁽³⁾ après 300 cycles de gel-dégel

8.5 CORRÉLATIONS ENTRE LES RÉSULTATS DES MBE ET DES BÉTONS CORRESPONDANTS

Grâce à la méthode MBE, il a été possible d'effectuer une étude très étendue de l'effet des ciments binaires et ternaires sur les différentes propriétés de deux types de MBE (MBE-AP et MBE-SF). Ce qui a attiré à utiliser cette méthode dans cette étude ce sont les résultats d'Erdem et coll. [2009] qui ont montré que des tests à l'échelle réduite des MBE peuvent être

utilisés pour évaluer l'effet de la composition du mélange sur les propriétés rhéologiques des bétons fluides. De plus, l'étude des MBE à la place des bétons présente plusieurs avantages du fait que les mortiers sont plus faciles à fabriquer, nécessitant moins de ressources humaines et moins de coûts afférents. D'ailleurs, c'est ce qui a permis de fabriquer plus de 350 MBE dans cette étude dont les propriétés rhéologiques ont été tous suivies jusqu'à 60 min.

Il s'agit ici de relier les résultats trouvés à l'échelle des MBE avec ceux des bétons en termes de la demande en SP, propriétés rhéologiques (τ_0 et μ_{pl}) et f'_c .

8.5.1 Demande en SP

Dans le cas des BAP, la demande en SP a été ajustée pour obtenir un étalement de 680 ± 20 mm, ce qui correspond à un étalement de 260 ± 10 mm sur MBE-AP. Comme il a été déjà mentionné dans l'annexe A, cet étalement a bien été obtenu pour les MBE-AP en présence du couple PNS-AV1. Par contre, en présence du couple PC-AV2 un étalement de 240 ± 10 mm a pu être obtenu tout en ayant des seuils de cisaillement proches pour les deux cas SP-AV. Les BAP ont été confectionnés avec un rapport E/P de 0,45 et un dosage en poudres de 460 kg/m^3 . Le dosage en AV (AV1 et AV2) a été gardé constant pour tous les BAP et correspond à celui des mélanges de références. La figure 8.10 représente la corrélation entre la demande en SP des MBE-AP et des BAP correspondants validés. Il est constaté que peu importe le mélange ternaire et le type du couple SP-AV utilisé, une excellente relation linéaire est obtenue entre la demande en SP (PNS ou PC) des MBE-AP et celle des BAP validés. En effet, il apparaît clairement que la même demande en PNS et en PC utilisée à l'échelle des MBE-AP a été suffisante à l'échelle des BAP pour atteindre l'étalement correspondant prédit. La même conclusion a été notée par Erdem et al. [2009].

Par ailleurs, dans le cas des BSF, la demande en SP a été ajustée pour atteindre un étalement de 550 ± 20 mm qui correspond un étalement de 210 ± 10 mm sur MBE-SF. Ces bétons ont été fabriqués avec un rapport E/P de 0,41 et un dosage en poudres de 400 kg/m^3 . Ces bétons n'ont pas nécessité l'utilisation d'un AV, néanmoins l'utilisation d'un AEA pour avoir une teneur en air de 5% à 7% était nécessaire pour des raisons de durabilité. Cependant, les MBE-SF ont été confectionnés sans AEA bien au contraire un agent desentraineur d'air a été utilisé. La figure 8.11 montre une très bonne corrélation entre la demande en SP des MBE-SF (sans

AEA) et des BSF validés (avec AEA).. La demande en SP des BSF est inférieure de 17% à celle des MBE-SF, ce qui signifie que l'entraînement de 1% d'air dans le BSF correspond en une réduction de l'ordre de 3% dans la demande en SP de ce béton.

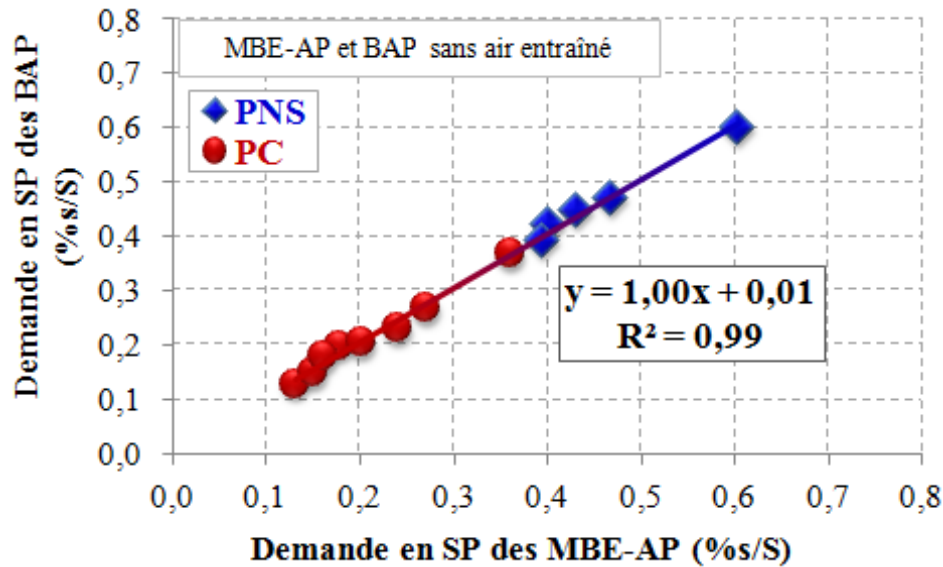


Figure 8.10 Corrélation entre la demande en SP (exprimée en extrait sec /masse de poudre) des MBE-AP sélectionnés et les BAP correspondants validés

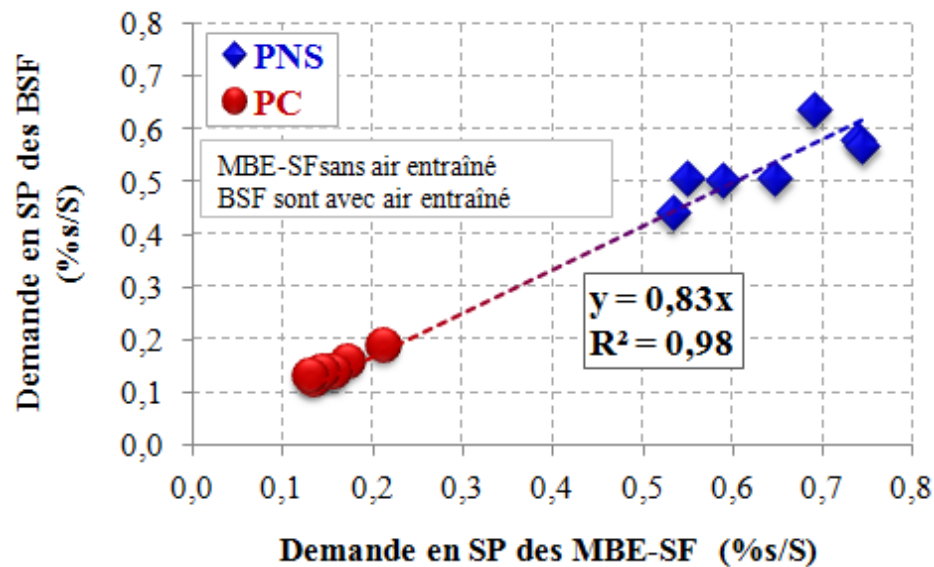


Figure 8.11 Corrélation entre la demande en SP (exprimée en extrait sec /masse de poudre) des MBE-SF sélectionnés et les BSF avec air entraîné correspondants validés

8.5.2 Étalement

Plusieurs comparaisons ont été effectuées entre la fluidité des MBE et celle des bétons correspondant mesurée par étalement. La figure 8.12-a représente une comparaison entre les étalements des MBE et des bétons correspondants. Les mesures prises initialement (à 10 min du contact eau-poudres) sont séparées de celles prises à 30 et 60 min. À 10 min, ce sont les résultats correspondants à des fluidités de 680 ± 20 mm et 550 ± 20 mm qui sont retrouvés. Cependant, à 30 et 60 min, une très bonne corrélation est trouvée entre la perte de fluidité des MBE en comparaison avec celle des bétons correspondants. La perte de fluidité des bétons est estimée à environ 2,55 fois plus grande que celle des MBE. Les résultats d'un opérateur différent (Erdem et coll. [2009]) avec une composition de mélanges complètement différente, ont été insérés avec les résultats de cette étude pour raffiner la comparaison mais en séparant les résultats initiaux (à 10 min) de ceux à 30 et 60 min. Il est trouvé que les résultats d'Erdem et coll. [2009] (concordent très bien avec les résultats de cette étude (figure 8.12-b). La figure 8.12-c représente la corrélation entre tous les résultats pris à 10, 30 et 60 min incluant ceux d'Erdem et coll. Il est remarqué que c'est quasiment la même relation qui a été trouvée dans la figure 8.12-a et que l'étalement des bétons correspond bien à 2,5 fois à celui des MBE tout en ayant une marge d'erreur de ± 20 mm.

8.5.3 Seuil de cisaillement et viscosité plastique

Les mesures de τ_0 et μ_{pl} des MBE et des bétons correspondants ont été effectuées moyennant les viscosimètres ConTec 6 et 5, respectivement. Les résultats des τ_0 des BAP et des BSF à 10, 30 et 60 min sont comparés avec ceux des MBE correspondant sur la figure 8.13. Une relation linéaire proportionnelle est trouvée avec un coefficient de corrélation de 0,71. Les résultats exposés correspondent à des étalements compris entre 520 à 690 mm. Pour les mélanges autoplaçants, des étalements de 680 ± 20 mm ont donné des τ_0 de 64 ± 4 Pa, ce qui a correspondu à des étalements de 260 ± 10 mm sur MBE avec des τ_0 de 15 ± 2 Pa. Tandis que, les mélanges semi-fluides ayant des étalements de 550 ± 20 mm sur bétons ont donné des τ_0 de 88 ± 11 Pa correspondants sur MBE à des étalements de 210 ± 10 mm avec des τ_0 de 30 ± 5 Pa.

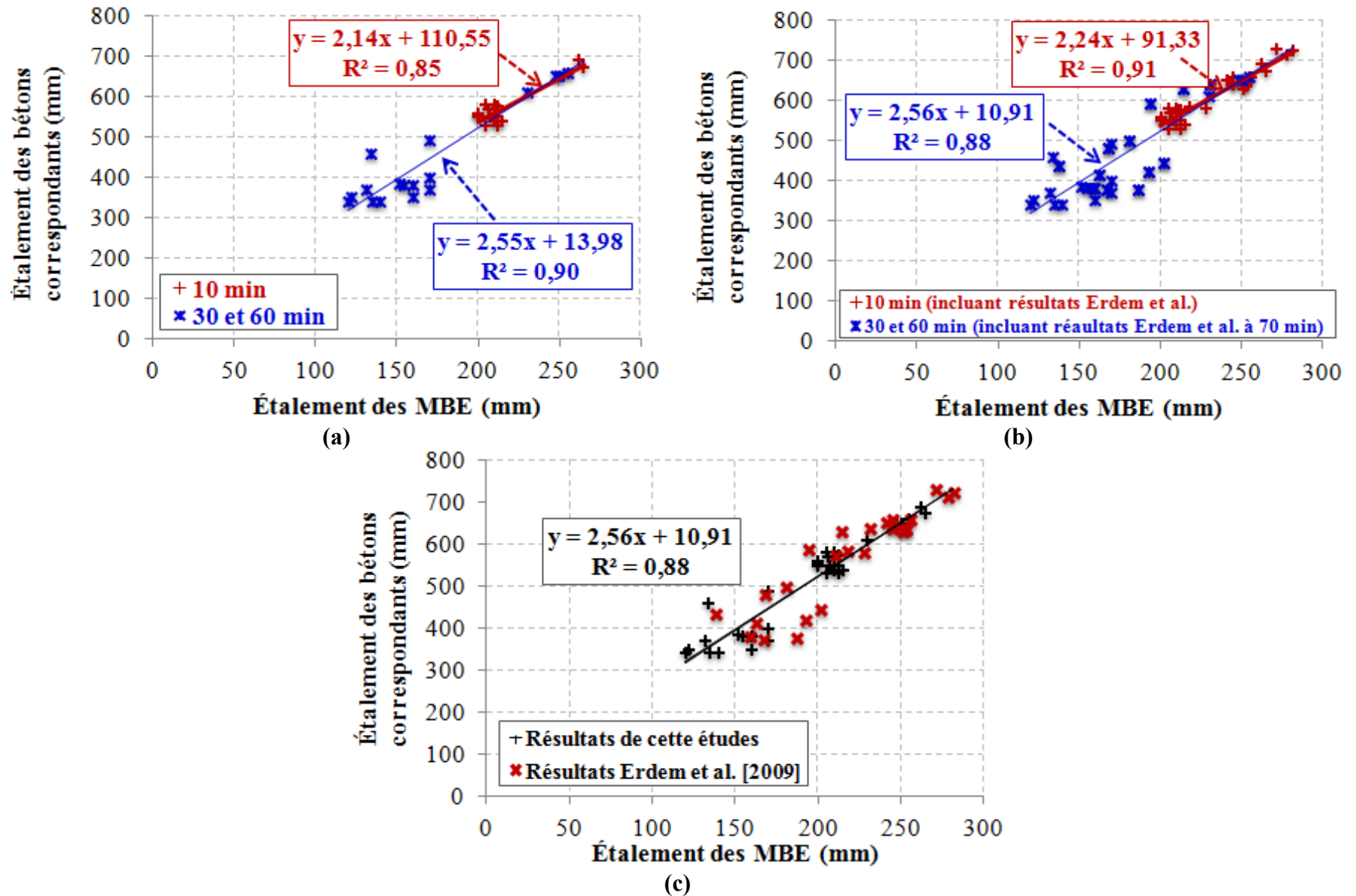


Figure 8.12 Corrélations entre l'étalement des MBE avec celui des bétons correspondant (a) Résultats à 10 min séparés de ceux de 30 et 60 min; (b) Résultats à 10 min séparés de ceux de 30 et 60 min mais incluant les résultats d'Erdem et coll. [2009] (c) Résultats 10, 30 et 60 min tous ensemble incluant les résultats d'Erdem et coll. [2009]

Par ailleurs, une tendance linéaire avec un coefficient de corrélation de 0,76 est obtenue entre la μ_{pl} des BAP et celle des MBE-AP correspondants (figure 8.14). Cette tendance a été bonifiée en insérant les résultats des μ_{pl} des MBE-SF et des BSF à air entraîné correspondants avec un coefficient de corrélation de 0,83 (figure 8.15). Ceci signifie que le fait que les BSF soient confectionnés avec air entraîné, ça n'a pas empêché d'obtenir une bonne relation avec la μ_{pl} des MBE-SF confectionnés sans air entraîné. Par contre, il faut souligner que tous les BSF avaient des pourcentages d'air assez proches compris entre 5% et 6%.

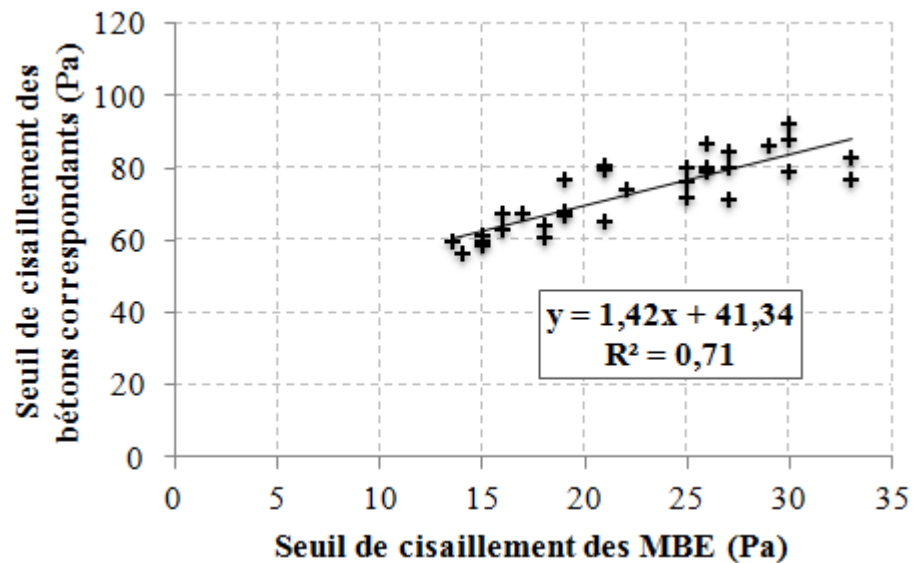


Figure 8.13 Corrélation entre le seuil de cisaillement des MBE-AP et des MBE-SF et celui des bétons correspondants

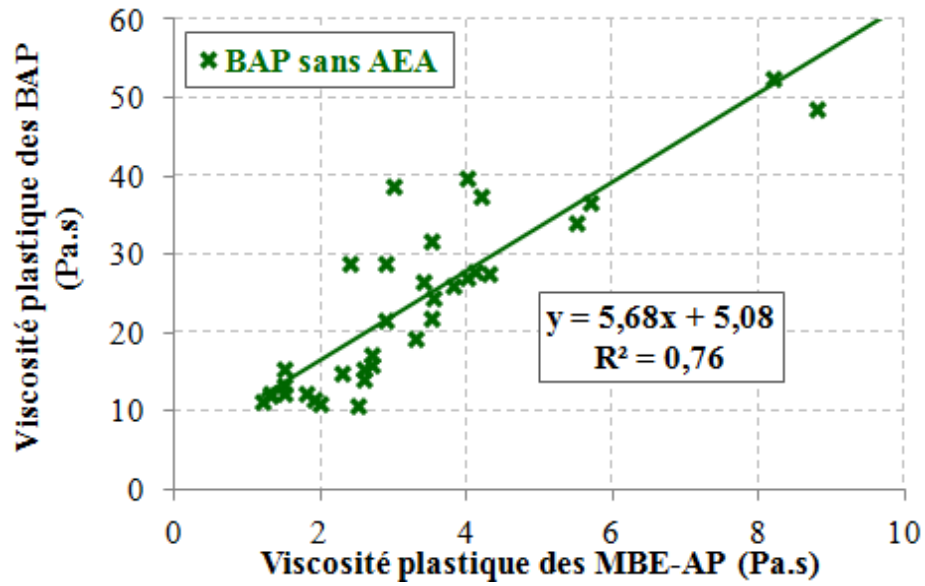


Figure 8.14 Corrélation entre la viscosité plastique des MBE-AP et celui des BAP correspondants

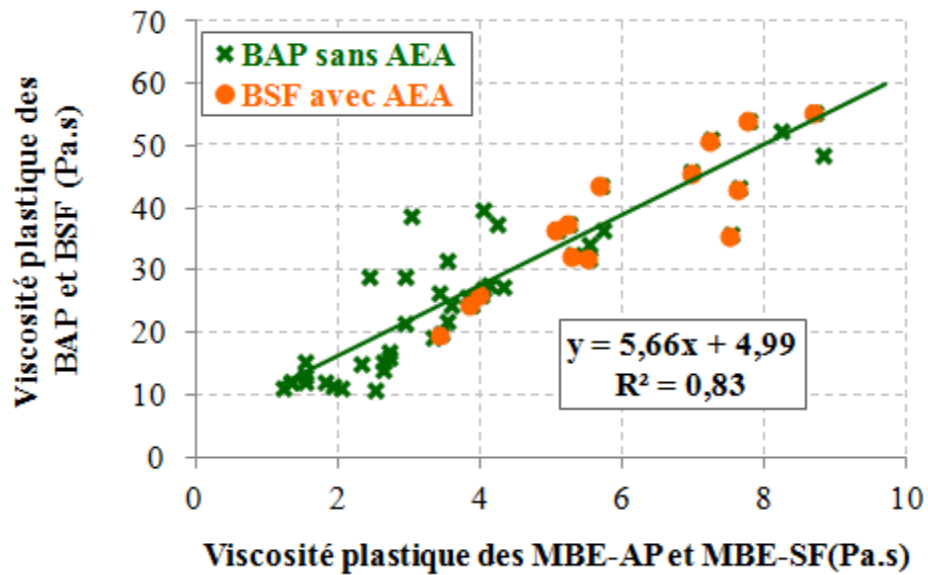
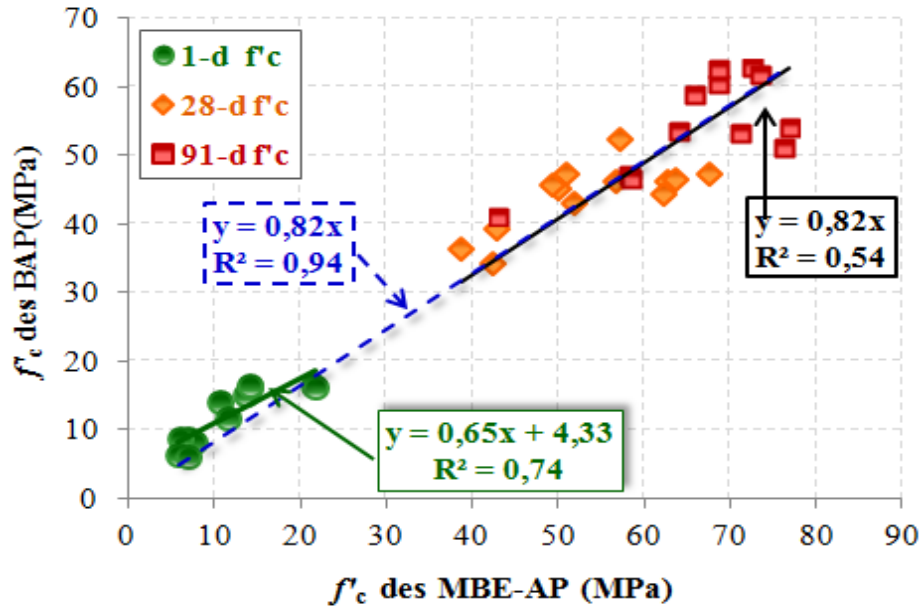
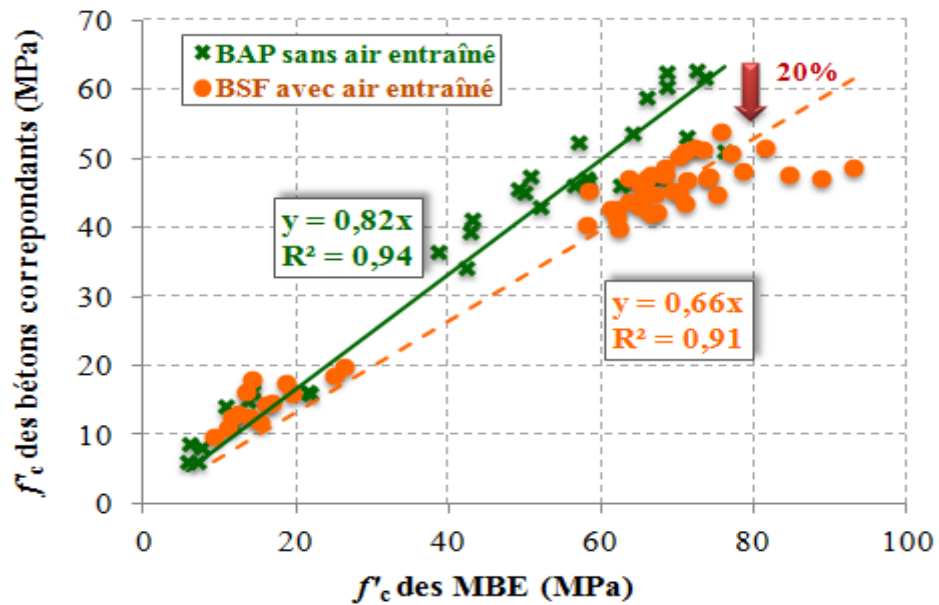


Figure 8.15 Corrélation entre la viscosité plastique des MBE-AP et des MBE-SF et celle des bétons correspondants (BSF sont à air entraîné)

8.5.4 Résistance à la compression

La figure 8.16 compare les résultats des f'_{c1} , f'_{c28} et f'_{c91} des MBE-AP avec ceux des bétons correspondants. Les f'_c des MBE ont été effectuées sur des échantillons cubiques de 50 mm de côté et celles des bétons ont été effectuées sur des cylindres de 100×200 mm. Une relation très satisfaisante a été obtenue entre les f'_{c1} , f'_{c28} et f'_{c91} des MBE-AP et ceux des BAP validés avec un coefficient de corrélation de 0,94 où les f'_c des bétons correspondent à 82% des f'_c des MBE-AP (figure 8.16). Cependant, cette corrélation s'affaiblit en séparant les f'_{c1} des f'_{c28} et f'_{c91} . En effet, les f'_{c28} et f'_{c91} des bétons correspondent toujours à 82% celles des MBE mais avec un R^2 de 0,54. La nouvelle relation obtenue pour f'_{c1} est représentée sur la figure 8.16 dont le coefficient de corrélation est de 0,74. Il est bien clair que ce qui est attendu de la méthode des MBE c'est d'avoir une estimation à titre comparatif de ce qui est prévu à l'échelle du béton. De ce fait, il s'avère qu'il est plus judicieux d'utiliser les deux relations séparées pour avoir une estimation plus proche des f'_c à jeune âge d'un côté et à moyen âge (28 et 91 jours) de l'autre côté.

Pour avoir une idée générale de la relation entre les f'_c des MBE-SF sans air entraîné et des BSF correspondants avec air entraîné, les résultats ont été comparés avec ceux des mélanges autoplaçants. La figure 8.16 montre que la tendance entre les f'_{c1} des MBE-SF et des BSF est proche de celles des mélanges autoplaçants. Ceci signifie qu'à jeune âge, l'air entraîné des BSF n'a pas un effet notable sur la corrélation entre MBE et les bétons correspondants. Tandis qu'à 28 et 91 jours, la courbe de tendance entre les f'_c des MBE-SF et des BSF baisse de 20% par rapport à celle des mélanges autoplaçants. Ceci indique qu'en plus que les f'_{c28} et f'_{c91} des bétons correspondent à 82% de celles des MBE, pour chaque 1% d'air entraîné dans le béton, il faut prévoir une diminution de 3 à 4% dans ces f'_c .


 Figure 8.16 Corrélation entre f'_c des MBE-AP et celle des BAP correspondants

 Figure 8.17 Comparaison entre les corrélations de f'_c dans les BAP sans air entraîné et des BSF avec air entraîné

8.6 CONCLUSIONS

Ce dernier chapitre a permis de valider les meilleurs mélanges ternaires qui ont été obtenus grâce à l'optimisation multiparamétrique sur les MBE-AP et les MBE-SF ternaires. Cette validation a concerné deux types de bétons fluides à haute performance à rhéologie adapté qui sont les BAP pour la construction de bâtiments et les BSF pour les infrastructures de transport. Le but était d'avoir des bétons écologiques présentant les meilleurs rapports performance/prix.

Il est évident que les principaux défis des bétons fluides sont d'assurer les critères de la résistance au blocage et à la ségrégation. Ces défis sont d'autant plus amplifiés avec des mélanges conçus avec un rapport E/P moyennement élevée et avec des taux de remplacement maximaux en AM.

Pour plus de 100 MBE-AP ternaires confectionnés (8 combinaisons \times 13 mélanges par combinaison), cinq mélanges ternaires ont été sélectionnés pour les valider sur des BAP destinés à la construction des bâtiments. Les différents mélanges ternaires ont présenté généralement une performance convenable. Cependant, le BAP contenant 35% L100 + 2% FS (PNS) a montré exclusivement le meilleur rapport performance/prix. C'est un mélange qui s'est caractérisé par une μ_{pl} de 22 Pa.s et une faible thixotropie tout en ayant une bonne stabilité statique. À l'état durci, des f'_{c28} qui dépassent 50 MPa ont été obtenues avec une baisse dans le ε_{s287} de 24% par rapport à celui du mélange de référence.

Par ailleurs, parmi les 144 MBE-SF confectionnés à partir des mélanges ternaires (12 combinaisons \times 12 mélanges par combinaison), 12 mélanges ternaires ont été sélectionnés pour la validation à l'échelle des BSF destinés aux infrastructures de transport. Tous les mélanges ternaires ont présenté une performance très satisfaisante que se soit à l'état frais ou à l'état durci des BSF. De plus, ces mélanges ont donné différentes propriétés rhéologiques avec des μ_{pl} comprises entre 20 à 55 Pa.s et des thixotropies qui varient de faible à très élevée. De tous ces mélanges, quatre ont été choisis pour faire des essais de durabilité.

Les BSF qui ont donné la meilleure performance aux différents essais de durabilité sont ceux qui contiennent 30% CV-F + 4% FS (PNS), 30% CV-C + 4% FS (PC) et 50% L120 + 4,5% MK (PC). Les deux premiers mélanges ont donné des BSF avec des μ_{pl} de 32 et 24 Pa.s, respectivement et une faible thixotropie, tandis que le dernier mélange a donné un BSF avec une μ_{pl} de 56 Pa.s et une thixotropie très élevée.

En se basant sur la comparaison des résultats trouvés sur les MBE-AP et les MBE-SF avec ceux des bétons correspondants, il est confirmé que la méthode du MBE est un excellent outil qui peut être utilisé pour estimer la demande en SP, μ_{pl} , τ_0 ainsi que les f'_c des bétons correspondants. Pour des mélanges sans air entraîné, peu importe le mélange ternaire et le type du couple SP-AV utilisé, une parfaite relation 1:1 a été trouvée entre la demande en SP des MBE-AP et des BAP correspondants. Tandis que lorsqu'il s'agit de prédire la demande en SP des bétons avec air entraîné, pour chaque 1% d'air, une réduction de 3% de SP doit être prévue par rapport à la demande des MBE qui sont sans air entraîné. Les MBE ont aussi donné une bonne indication du τ_0 et de la μ_{pl} des bétons correspondants. Pour les f'_c , ce sont celles à jeune âge qui ont montré une meilleure corrélation en comparaison avec celles à 28 et 91 jours.

CHAPITRE 9 : CONCLUSIONS GÉNÉRALES

Cette thèse s'inscrit parmi les études planifiées dans le cadre de la « chaire de recherche industrielle sur les bétons à haute performance fluides à rhéologie adaptée (BHPFRA) ». La sélection des ajouts minéraux (AM) et des adjuvants chimiques (superplastifiants, SP et agents de viscosité, AV) est cruciale dans la conception de ces bétons fluides. Dix sept partenaires industriels ont participé au programme de cette chaire de recherche dont plusieurs ont pris en charge de proposer les différents AM et les adjuvants chimiques qui ont fait l'objet de cette étude et ceci en fonction des besoins réels du marché du béton.

Le but principal de cette étude était de développer une base de données sur l'effet des propriétés chimiques et physiques de huit différents AM et leurs interactions avec les adjuvants (SP, AV) sur les propriétés des mortiers de bétons équivalents (MBE) des BHPFRA. Cette base de données a servi dans d'autres études inscrites dans le programme de la même chaire de recherche et aussi au développement des BHPFRA destinés à la construction de bâtiments et aux infrastructures de transport..

Dans ce dernier chapitre, il s'agit de souligner et discuter de façon générale les points qui ont marqué l'étude sur les systèmes binaires, les ciments ternaires et la validation sur béton tout en présentant les perspectives à exploiter dans ce domaine.

9.1 ÉTUDE DES CIMENTS BINAIRES

104 MBE ont été confectionnés dans le but d'étudier l'effet des caractéristiques chimiques et physiques des AM sur les propriétés de deux types de MBE. Ces derniers sont les MBE-AP correspondants aux bétons autoplaçants (BAP) pour la construction de bâtiments (rapport eau/poudres (E/P) 0,45 et poudres = 460 kg/m³) et les MBE-SF correspondants aux bétons semi-fluides (BSF) destinés aux infrastructures de transport (rapport E/P = 0,41 et poudres = 400 kg/m³). Pour les deux types de MBE, huit AM (un ciment type GU, six AM et deux 2 fillers calcaires) ont été incorporés à tour de rôle à différents pourcentages de substitution massique du ciment. Les MBE-AP contenant les ciments binaires ont été étudiés en présence deux différents couples SP-AV (PNS-AV1 et PC-AV2) où PNS et PC sont les types de SP à bases de poly-naphtalène sulfoné et poly-

carboxylates, respectivement. Tandis que l'étude sur les MBE-SF contenant des ciments binaires a été effectuée en présence des deux types de SP (PNS et PC) où l'utilisation d'un AV n'était pas nécessaire. Les propriétés étudiées comprennent les propriétés rhéologiques (seuil de cisaillement τ_0 et la viscosité pastique μ_{pl}), la stabilité, la cinétique d'hydratation et le développement des résistances à la compression à 1, 28 et 91 jours.

Pour un dosage fixe en adjuvants chimiques (SP avec ou sans AV compatible), Il a été montré que:

- Le surface spécifique des poudres qui sont beaucoup plus fin que le ciment, comme le métakaolin (MK) et la fumée de silice (FS), a plus d'effet sur τ_0 des MBE que μ_{pl} . τ_0 est augmenté d'une façon très significative en présence de ces poudres.
- La μ_{pl} des MBE-AP et des MBE-SF est influencée directement par la forme des particules où plus la forme est angulaire et irrégulière (facteur de Ferret autour de 0,4), plus μ_{pl} est importante. Par contre, pour une forme sphérique des particules (facteur de Ferret proche de 1), la μ_{pl} des mélanges a tendance à diminuer. Cependant, certaines exceptions ont été notées dans le cas des MBE-AP contenant de la cendre volante de Classe F (CV-F) et les MBE-SF contenant L100 et L120 (laitiers de finesse modérée et élevée, respectivement). En effet, malgré sa forme presque sphérique avec un facteur Ferret de 0,887, l'augmentation du pourcentage de CV-F jusqu'à 40% a augmenté μ_{pl} des MBE-AP de 60% en présence de PNS-AV1, par rapport au MBE-AP de référence. Ceci a été attribué à la présence des particules du carbon imbrûlé dont la forme des particules est irrégulière. Par contre, la forme angulaire allongée de L100 ou L120 n'a pas empêché de diminuer μ_{pl} de ces MBE-SF en présence de PC. Ce qui a été attribué fortement au fait qu'en présence de la combinaison PC, une augmentation remarquable de la fluidité a été notée, entraînant les particules vitreuses allongées du laitier à s'auto-orienter facilement pour suivre la direction de l'écoulement.
- Il a été très difficile de généraliser l'effet de la granulométrie des AM sur les propriétés rhéologiques des MBE. D'une part, une distribution granulométrique étalée due au remplacement partiel du ciment par l'une des deux cendres volantes

CV-F ou CV-C (coefficient d'uniformité (n) entre 0,946 et 0,708) a correspondu à une augmentation dans la fluidité des deux types de MBE. D'autre part, une distribution un peu plus étroite due au remplacement d'une partie de ciment par L100 ou L120 (valeurs de n entre 0,946 et 1,045) a aussi correspondu à une augmentation de la fluidité. Ceci indique bien que l'effet réel de la granulométrie des poudres a été masqué par l'interaction qui a eu lieu entre les poudres et les adjuvants chimiques.

- Les mesures de la compacité granulaires effectuées par la méthode humide sur des pâtes n'ont pas pu être reliées aux propriétés rhéologiques des MBE (τ_0 et μ_{pl}). Cependant, tous les AM avec les différents pourcentages et les divers cas d'adjuvants (SP sans et avec AV) ont contribué à améliorer l'état de la compacité granulaire des pâtes. De plus, la compacité granulaire a manifesté une étroite relation avec la taille moyenne des particules. Plus la taille des particules est grossière ou fine, plus la compacité granulaire résultante est plus importante. Le filler calcaire CC3 est beaucoup plus fin que le filler calcaire CC35, mais pour un remplacement partiel de 40% de ce dernier, la compacité granulaire est améliorée de 14%, 8%, 17% et 10% comparativement à 12%, 4%, 13% et 3% pour le CC3 en présence de PNS, PC, PNS-AV1 et PC-AV2, respectivement, par rapport aux mélanges de référence.
- Le type de SP a influencé la compacité granulaire où une meilleure compacité des pâtes est notée en présence de PC, ce qui est évidemment lié à la forte capacité de dispersion des PC par rapport au PNS. Par ailleurs, la présence d'un AV a diminué, d'une part, la compacité granulaire des coulis mais a aussi, d'autre part, augmenté plus considérablement le rapport E/P (volumétrique) correspondant à la compacité maximale. En effet, les rapports E/P (volumétrique) correspondant à la compacité maximale des mélanges références (100% ciment) sont de 0,620 et 0,525 pour des compacités de 0,577 et 0,614 en présence de PNS et PC et de 0,800 et 0,625 pour des compacités de 0,532 et 0,586 en présence de PNS-AV1 et PC-AV2, respectivement.
- L'interaction poudres – SP a été évaluée en déterminant le point de saturation en SP (PNS et PC), sans et avec AV, dans des coulis contenant les taux de remplacement minimaux et maximaux en AM. Les résultats ont montré que :

- La présence d'AV1 et AV2 en couple avec PNS et PC, respectivement, a eu pour effet d'augmenter les points de saturation qui sont de 0,55%, 0,62%, 0,18% et 0,22% pour le PNS, PNS-AV1, PC et PC-AV2, en ordre respectif pour les mélanges références.
- L'utilisation d'un AV n'a pas influencé la tendance des AM à augmenter ou à diminuer la demande en SP. Cette tendance est restée quasiment la même en présence ou en absence d'AV.
- Par ailleurs, la demande en SP (PNS ou PC) a été influencée par le type et les propriétés physiques des poudres. En effet, le type de la CV a eu une influence notable sur la demande en SP où pour les coulis qui contiennent 40% CV-F, le dosage en PNS et PC était 25% et 36%, respectivement, plus important que celui des coulis contenant 40% CV-C. Ceci signifie que les deux SP s'adsorbent plus sur les particules de la CV-F que sur les particules de la CV-C.
- En présence du PNS, le laitier le plus fin (L120) semble procurer plus de sites actifs pour l'adsorption du PNS, ce qui a résulté à un point de saturation en SP comparable à celui du coulis de référence. Cependant, la finesse du laitier n'a pas influencé la demande en PC des coulis que ce soit avec ou sans AV, où le point de saturation en PC en présence de 50% L100 ou 50% L120 a été diminué, pour les deux, de 33% par rapport à celui du coulis de référence.
- Les fillers CC3 et CC35 (dont le diamètre moyen 3 mm et 35 mm, respectivement) semble avoir plus d'affinité avec le PNS en comparaison avec le PC. Cependant, la finesse n'a pas manifesté un effet notable sur le point en saturation. Une diminution dans la demande en PC d'ordre de 18% est notée dans les coulis contenant 40% CC35 ou 40% CC3 alors que la diminution est de 3% et 10% pour le PNS avec 40% CC35 ou 40% CC3.
- Au niveau de la chaleur d'hydratation des MBE, les résultats ont montré que le remplacement partiel du ciment par soit CV-F, CV-C, CC35, L100 ou encore L120 cause un prolongement dans la durée de la période dormante et une diminution dans l'intensité du 2^{ème} pic d'hydratation. Le prolongement de la période dormante pour des taux de remplacement maximaux peut varier entre 1 et 11 h avec une diminution

dans l'intensité du 2^{ème} pic d'hydratation qui correspond au même pourcentage de remplacement en question. Tandis que, la substitution partielle du ciment par CC3, MK ou FS a entraîné un raccourcissement de la période dormante et une légère augmentation dans l'intensité du 2^{ème} pic d'hydratation sans entraîner une grande différence au niveau de la chaleur totale dégagée au bout de 48 h d'hydratation.

- Les résultats de dégagement de chaleur et de développement de résistance à jeune âge ont permis de diviser les AM étudiés en deux classes : les poudres à réactivité élevée (FS et MK) et les poudres à faible réactivité (CV-F, CV-C, L100, L120, CC35 et CC3) qui ont servi à l'étude des ciments ternaires.

9.2 ÉTUDE DES CIMENTS TERNAIRES

Dans le but de mettre la lumière sur l'effet des ciments ternaires sur les propriétés des MBE-AP et MBE-SF, près de 250 MBE ont été confectionnés. Les Dosages en SP ont été ajustés pour avoir un étalement fixe pour chacun des deux types de MBE. Différentes combinaisons ternaires ont été évaluées en utilisant la méthode des plans d'expériences dont 8 combinaisons pour les MBE-AP et 12 combinaisons pour les MBE-SF. Un plan de surface de réponse de 3² a été adopté pour chaque combinaison où il s'agissait de fabriquer au minimum 12 mélanges par combinaison avec différents pourcentages d'une poudre à faible réactivité avec une poudre à réactivité élevée. Plusieurs modèles statistiques ont été proposés pour la demande en SP, μ_{pl} , ressuage forcé, temps de prise, f'_c (à 1, 28 et 91 j). Les constatations qui ont marqué cette étude sont les suivantes :

- L'interaction de l'utilisation d'une poudre à faible réactivité et une poudre à réactivité élevée est fortement liée au rapport E/P utilisé. Pour un rapport E/P relativement élevé (0,45), l'effet de la combinaison de deux poudres n'est que la somme des effets individuels de chaque poudre. Par contre, pour un rapport E/P relativement faible (0,41), un effet d'interaction entre les poudres commence à prendre place pour plusieurs réponses.
- Les poudres à faibles réactivité (CV-F, CV-C, L100, L120, CC3) ont joué un rôle important dans la diminution de la demande en SP mais qui est fortement contre-

balancée par les poudres à réactivité élevée à cause de leur importante surface spécifique.

- Les combinaisons ternaires qui peuvent donner des μ_{pl} les plus faibles sont celles qui combinent la CV-C ou CC3 avec la FS en présence de PC (ou PC-AV2). Avec ces combinaisons, des μ_{pl} aussi faibles que 1,5 Pa.s et 3,2 Pa.s ont été obtenues pour les MBE-AP et les MBE-SF, respectivement, sans nuire à la stabilité de ces milieux. Par ailleurs, les combinaisons ternaires qui ont donné les μ_{pl} les plus importantes sont celles qui combinent L120 ou CV-F avec MK en présence de PNS (ou PNS-AV1) avec des valeurs allant jusqu'à 6 Pa.s pour les MBE-AP et jusqu'à 12 Pa.s pour les MBE-SF. Ces derniers peuvent s'avérer particulièrement collants.
- Les ciments ternaires ont fortement influencé le dégagement de chaleur des MBE. L'utilisation de la FS et du MK dans les ciments ternaires ont eu un effet négatif sur l'hydratation où cette dernière a été retardée en comparaison que lorsque ces deux poudres ont été utilisées dans les ciments binaires. Pour les MBE-AP, le pourcentage des poudres à faible réactivité a affecté la durée de la période dormante et l'intensité du 2^{ème} pic alors que le pourcentage de la poudre à réactivité élevée dû à l'effet de dilution du ciment. D'autre part, le pourcentage des poudres à réactivité élevée ont influencé l'intensité du 3^{ème} pic d'hydratation qui est lié à la transformation de l'ettringite au monosulfoaluminate et à la reprise de l'hydratation du C₃A. Pour des taux de remplacement maximaux en poudre à faible réactivité l'augmentation du pourcentage des poudres fines comme la FS ou du MK agissent comme des sites de nucléation favorisant l'hydratation et le dépôt des produits d'hydratation qui semble être plus stimulés en présence de PC-AV2. Pour tous les MBE-AP ternaires, les durées de la période dormante étaient comprises entre 4 et 9 h avec une chaleur totale dégagée n'excédant pas 225 J/g poudres. Pour les MBE-SF, la chaleur d'hydratation était influencée seulement par le pourcentage total de remplacement où le type de la combinaison ternaire ou du SP n'a pas montré un effet notable. La durée de la période dormante pour tous les MBE-SF était de $3,7 \pm 0,7$ h et le dégagement total de la chaleur au bout de 37 h d'hydratation pour des taux de remplacement maximaux était de 210 ± 13 J/g poudres.

- Au niveau de développement des f'_c , toutes les poudres y compris celles à réactivité élevée ont manifesté un effet négatif sur les f'_c à jeune âge. Cet effet était beaucoup plus marqué dans les MBE-AP à cause du rapport E/P relativement élevé (0,45), ce qui a conduit à annuler les deux combinaisons CV-F – FS et CV-F – MK d’une éventuelle validation sur béton.
- Le choix du MK comme une alternative à la FS n’a pas manifesté les attentes souhaitées au niveau des f'_c des MBE-AP ternaires. Cependant, au niveau des MBE-SF, l’utilisation du MK dans les ciments ternaires a montré une performance acceptable au niveau des f'_c surtout à 28 jours où des valeurs qui ont dépassé 70 MPa ont été obtenues en combinant L120 avec MK. Des valeurs du même ordre de grandeur ont pu être obtenues dans les MBE-AP contenant les combinaisons L100 – FS et CC3 – FS.
- À 91 jours, certaines combinaisons ternaires ont manifesté un plus grand gain de f'_{c91} en comparaison avec f'_{c28} grâce à la réaction pouzzolanique de la FS et du MK avec le ciment. Les gains les plus notables étaient de 64% pour les MBE-AP contenant CV-F – FS (PC-AV2) et de 50% et 36% dans les MBE-SF contenant CV-C – FS et CV-C – MK (PNS et PC), respectivement.

9.3 VALIDATION SUR BÉTON

Dans le but de développer des BHPFRA (BAP et BSF) contenant des ciments ternaires et présentant les meilleures performances, une optimisation multiparamétrique a été effectuée où différents critères de sélections ont été mis au point pour chaque combinaison ternaire.

Les résultats de la validation sur BAP ont montré que le mélange contenant 35% L100 + 2% FS (PNS) a donné exclusivement la meilleure performance à l’état frais et durci. Ce mélange s’est caractérisé par une μ_{pl} de 22 Pa.s et une faible thixotropie tout en ayant une bonne stabilité statique. À l’état durci, des résistances qui dépassent 50 MPa ont été obtenues à 28 jours avec une baisse de 24% dans le retrait au séchage, mesuré à 287 jours, par rapport à celui du mélange de référence. Par ailleurs, les ciments ternaires qui ont donné des BSF présentant la meilleure performance à l’état frais, durci et de

durabilité sont ceux qui contiennent 30% CV-F + 4% FS (PNS), 30% CV-C + 4% FS (PC) et 50% L120 + 4,5% MK (PC). Ces mélanges ont présenté des μ_{pl} de 32, 24 et 56 Pa.s et des thixotropies de faibles à très élevées.

Finalement, la méthode du MBE s'avère un excellent outil qui peut être utilisé pour prédire l'effet des AM en combinaison avec des SP (avec ou sans AV compatibles) sur les propriétés des bétons fluides. Pour les différents mélanges ternaires utilisés et en présence des deux couple SP-AV, une parfaite relation 1 : 1 a été trouvée entre la demande en SP des MBE-AP et des BAP correspondants. De plus, une très bonne corrélation a été trouvée entre la demande en SP des MBE-SF, qui étaient sans air entraîné, et des BSF correspondants qui étaient à leur tour à air entraîné. De plus, les MBE peuvent aussi être utilisés pour estimer μ_{pl} , τ_0 ainsi que les f'_c des bétons correspondants.

CHAPITRE 10 : RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Aïtcin, P.-C. (2006) "GCI710 – Les liants hydrauliques", Université de Sherbrooke, Canada.

Akgerman, M. A., Zardkoohi, M. (1996) "Adsorption of phenolic compounds of fly ash", Journal of Chemical Engineering Data, vol. 41, n° 2, p. 185-187.

Albino, V., Dangelico, R. M., Natalicchio, A., Yazan, D. M. (2011) "Alternative energy sources in cement manufacturing – A systematic review of the body of knowledge", Network for Business Sustainability, 139 p.

Alexander, M. G., Magee, B. J. (1999) "Durability performance of concrete containing condensed silica fume", Cement and Concrete Research, vol. 29, n° 6, p. 917-922.

Ambroise, J., Péra, J. (2003) "Development of concrete with high early-stage strength", Proceedings of the 7th CANMET/ACI International Conference on Superplasticizers and Other Chemical Admixtures in Concrete, Berlin, Allemagne, p. 257-270.

Antiohos, S., Tsimas, S. (2004) "Investigating the role of reactive silica in the hydration mechanisms of high calcium fly ash/cement systems", Cement and Concrete Composites, vol. 27, p. n° 2, p.171-181.

Assaad, J., Khayat, K. H., Daczko J. (2004), "Evaluation of static stability of self-consolidating concrete", ACI Materials Journal, vol. 101, n° 3, p. 207-215.

ASTM (2013) "American Standard Testing Methods", West Conshohocken, PA, États Unis, vol. 04.01 & 04.02, Concrete and concrete aggregates.

Bàgel, L. (1998) "Strength and pore structure of ternary blended cement mortars containing blast furnace slag and silica fume", Cement and Concrete Research, vol. 28, n° 7, p. 1011-1022.

Banfill, P. F. G. (2003) "The rheology of fresh cement and concrete – A review", Proceedings of the 11th International Congress on the Chemistry of Cement, Durban, Afrique du Sud, p. 50-63.

Barnes H. A., Hutton J. F., Walters, K. (1993) "An introduction to rheology", Elsevier, Amsterdam.

BASF (2015) "Concrete technology of construction self-consolidating concrete: visual stability index (VSI)", Technical sheet, Master Builders solutions.

Bentz, D. P. (2006) "Modeling the influence of limestone filler on cement hydration using CEMHYD3D", Cement and Concrete Composites, vol. 28, n° 2, p. 124-129.

Bentz, D., Peltz, M., Winpigler, J. (2009) "Early-age properties of cement-based materials. II: Influence of water-to-cement ratio", *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 21, n° 9, p. 512-517.

Bjömström, J., Chandra, S. (2003) "Effect of superplasticizers on the rheological properties of cements", *Materials and Structures*, vol. 36, n° 10, p. 685-692.

Blask, O., Honert, D. (2003) "The electrostatic potential of highly filled cement suspensions containing various superplasticizers", *Proceeding of the 7th CANMET/ACI International Conference on Superplasticizers and Other Chemical Admixtures in Concrete*, Berlin, Allemagne, p. 87-101.

Bonavetti, V. L., Rahhal, V. F. Irassar, E. F. (2001) "Studies on the carboaluminate formation in limestone filler-blended cements", *Cement and Concrete Research*, vol. 31, n° 6, p. 853-859.

Bonneau, O. (1997) "Étude des effets physico-chimiques des superplastifiants en vue d'optimiser le comportement rhéologique des bétons à ultra-hautes performances", Thèse de doctorat, École Normale Supérieure de Cachan, France et Université de Sherbrooke, Canada.

Burgos-Montes, O., Palacios, M., Rivilla P., Puertas F. (2012) "Compatibility between superplasticizer admixtures and cements with mineral additions", *Construction and Building Materials*, vol. 31, p. 300-309.

Byfors, J. (1980) "Plain concrete at early ages", Édition Swedish Cement and Concrete Research Institute, Stockholm, Suède, 464 p.

Celik, I. B. (2009) "The effects of particle size distribution and surface area upon cement strength development", *Powder Technology*, vol. 188, n° 3, p. 272-276.

Chen, W., Shen, P., Shui, Z., Fan, J. (2012) "Adsorption of superplasticizers in fly ash blended cement pastes and its rheological effects", *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.*, vol. 27, n° 4, p. 773-778.

ConTec (2006) "Manual to use the ConTec BML viscometer", Reykjavik, Islande, 123 p.

Couarraze, G., Grossiord, J.-L., Huang, N. (2014) "Initiation à la rhéologie – Bases théoriques et applications expérimentales", 4^{ème} édition, Lavoisier, 328 p.

de Larrard, F. (1999) "Concrete mixture proportioning: A scientific approach", *Modern concrete Technology* (book 9), E & FN Spon, London, 448 p.

De Schutter, G. (2005) "Guidelines for testing fresh self-compacting concrete", European Research Project – Measurement of properties of fresh self-compacting concrete, 23 p.

Djamarani, K. M., Clark, I. M. (1997) "Caracterization of particle size based on fine and coarse fractions", Powder Technology, vol. 93, n° 2, p. 101-108.

Dodson, V. H. (2013) "Concrete Admixtures", Springer, 224 p.

EFNARC (2005) "Specification and guidelines for self-compacting concrete", UK, 32 p.

El Barrak, M. (2005) "Contribution à l'étude de l'aptitude à l'écoulement des bétons autoplaçants à l'état frais", thèse de doctorat, Université Toulouse III – Paul Sabatier, 232 p.

Emborg, M. (1999) "Rheology tests for self-compacting concrete - How useful are they for the design of concrete mix for full scale production?", Proceedings of the 1st International RILEM symposium on Self-Compacting Concrete, Stockholm, Suède, p. 95-105.

Erdem, T. K., Khayat, K. H., Yahia, A. (2009) "Correlating rheology of self-consolidating concrete to corresponding concrete-equivalent mortar", ACI Materials Journal, vol. 106, n° 2, p. 154-160.

Esping, O. (2007) "Early age properties of self-compacting concrete - Effects of fine aggregate and limestone filler", thèse de doctorat, Chalmers University of technology, Göteborg, Suède, 196 p.

Fayed, M. E., Ottens, L. (1997) "Handbook of powder science and technology", 2^{ème} édition, 868 p.

Ferraris, C. F. (1999) "Measurement of the rheological properties of high performance concrete: state of the art report", Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology, État-Unis, vol. 104, n° 5, p. 461-478.

Ferraris, C. F., de Larrard, F. (1998) "Testing and modeling of fresh concrete rheology" Interagency Report 6094, National Institute of Standards and Technology, État-Unis, 61 p.

Ferraris, C. F., Obla, K. H., Hill, R. (2001) "The influence of mineral admixtures on the rheology of cement paste and concrete", Cement and Concrete Research, vol. 31, n° 2, p. 245-255.

Flatt, R. J. (1999) "Interparticle forced and superplasticizers in cement suspensions", Université de Lausanne, Suisse, 330 p.

Flatt, R., (2012) "Superplasticizers and rheology of concrete", Understanding rheology of concrete, édition Roussel, N., p. 144-208.

Flatt, R. J., Houst, Y. F. (2001) "A simplified view on chemical effects perturbing the action of superplasticizers", Cement and Concrete Research, vol. 31, n° 8, p. 1169-1176.

Flatt, R. J., Larosa, D. Roussel, N. (2006) "Linking yield stress measurements: Spread test versus Viskomat", Cement and Concrete Research, vol. 36, n° 1, p. 99-109.

Flatt, R. J., Martys, N. S., Bergström, L. (2004) "Rheology of cementitious materials", Réimprimé de MRS Bulletin, Materials Research Society, vol. 29, n° 5, p. 314-318.

Gesoğlu, M., Güneyisi, E., Özbay E. (2009) "Properties of self-compacting concretes made with binary, ternary, and quaternary cementitious blends of fly ash, blast furnace slag, and silica fume", Construction and Building Materials, vol. 23, n° 5, p. 1847-1854.

Golaszewski, J. G., Szwabowski, J. (2004) "Influence of superplasticizers on rheological behaviour of fresh cement mortars", Cement and Concrete Research, vol. 34, n° 2, p. 235-248.

Grünewald, S., Walraven, J. C., (2003) "Rheological measurements on self-compacting fibre reinforced concrete", Proceedings of the RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, Reykjavik, Islande, PRO 33, p. 49-58.

Hachemi, S. (2002) "Corrélation entre l'évolution des propriétés rhéologiques et l'évolution de la cinétique d'hydratation du béton autoplaçant à différentes températures au très jeune et jeune âge", Mémoire de DEA, Université d'Artois, France, 100 p.

Hanna, É., Luke, K., Perraton, D., Aïtcin, P.-C. (1989) "Rheological behaviour of portland cement in the presence of a superplasticizer", ACI Special Publication, vol. 119, p. 171-188.

Hanehara, S., Yamada, K. (1999) "Interaction between cement and chemical admixture from the point of cement hydration, absorption behaviour of admixture, and paste rheology", Cement and Concrete Research, vol. 29, n° 8, p. 1159-1165.

Hsien, H. K., Reginald, B. H. T. (2006) "Life cycle investigation of CO₂ recovery and sequestration", Environmental Science & Technology, vol. 40, n° 12, p. 4016-4024.

Hu, C. (1995) "Rhéologie des bétons fluides", thèse de doctorat, École Nationale des Ponts et Chaussées, France, 201 p.

Hunger, M. (2010) "An integral design concept for ecological self-compacting concrete", Eindhoven University of Technology, Pays-Bas, thèse de doctorat, 193 p.

Hwang, S.-D., Khayat, K. H., Bonneau, O. (2006) "Performance-based specifications of self-consolidating concrete used in structural applications", *ACI Materials Journal*, vol. 103, n° 2, p. 121-129.

Jolicoeur, C., Sharman, J., Otis, N., Lebel, A., Simard, M.-A., Page, M. (1997) "The influence of temperature on the rheological properties of superplasticized", *Cement Pastes*, Proceeding of the 5th CANMET/ACI International Conference, Rome, Italy, p. 379-405.

Jolicoeur, C., Simard, M.-A. (1998) "Chemical admixtures-cement interactions: Phenomenology and physico-chemical concepts", *Cement and Concrete Composites*, vol. 20, n° 1, p. 87-101.

Jones, M. R., Zheng, L., Newlands, M. D. (2003), "Estimation of the filler content required to minimize voids ratio in concrete", *Magazine of Concrete Research*, vol. 55, n° 2, p. 193-202.

Kadri E. H., Duval, R. (2002) "Effect of ultrafine particles on heat of hydration of cement mortars", *ACI Materials Journal*, vol. 99, n° 2, p. 138-142.

Kakali, G., Tsivilis, S., Aggeli, E. Bati, M. (2000) "Hydration products of C₃A, C₃S and portland cement in the presence of CaCO₃", *Cement and Concrete Research*, vol. 30, n° 7, p. 1073-1077.

Kazai, T. (1996) "Effect of temperature on rheological property of fresh cement paste in high fluid concrete", *Journal of the Society of Materials Science, Japan*, vol. 45, n° 2, p. 230-234.

Khayat, K. H. (1998) "Viscosity-enhancing admixtures for cement-based materials - An overview", *Cement and Concrete Composites*, vol. 20, n° 2-3, p. 171-188.

Khayat, K. H. (2008) "GCI 711 – Technologie avancée du béton", Université de Sherbrooke, Canada.

Khayat, K. H. (2009) "NSERC industrial research chair on high-performance flowable concrete with adapted rheology", Second IRC Meeting, Sherbrooke, Canada.

Khayat, K. H., Ghezal A. (2003) "Effect of viscosity-modifying admixture-superplasticizer combination on flow properties of SCC equivalent mortar", *Proceedings of the 3rd International Symposium on Self-Compacting Concrete*, Reykjavik, Islande, p. 369-385.

Khayat, K.H., Mikanovic, N. (2012) "Viscosity enhancing admixtures and the rheology of concrete", *Understanding Rheology of concrete*, édition Roussel, N., p. 209-228.

Khayat, K. H., Yahia, A., Sayed, M. (2008) "Effect of supplementary cementitious materials on rheological properties, bleeding, and strength of structural grout", *ACI Materials Journal*, vol. 105, n° 6, p. 585-593.

Kiattikomol, K., Jaturapitakkul, C., Solkpiriyakij, C., Chutubtim, C. (2001) "A study of ground coarse fly ashes with different fineness from various sources as pozzolanic materials", *Cement and Concrete Composites*, vol. 23, n° 4-5, p. 335-343.

Kim, B-G., Jiang, S., Aïtcin, P.-C. (1999) "Influence of molecular weight on PNS superplasticizer on the on the properties of cement pastes containing different alkali contents", *International Conference on the Role of Admixtures in High Performance Concrete, RILEM*, p. 97-111.

Kim, B., Jiang, S., Jolicoeur, C. Aïtcin, P.-C. (2000) "The adsorption behavior of PNS superplasticizer and its relation to fluidity of cement paste", *Cement and Concrete Research*, vol. 30, n° 6, p. 887-893.

Kinuthia, J.M., Wild, S., Sabir, B. B., Bai, J. (2000) "Self-compensating autogenous shrinkage in Portland cement-metakaolin-fly ash pastes" *Advanced Cement Research*, vol. 12, n° 1, pp. 35-43

Klemm, W. A., Adams, L. D. (1990) "An investigation of the formation of carboaluminates", *American Society for Testing and Materials, STP 1064*, p. 60-72.

Koehler, E. P., Fowler, D. W. (2007) "Aggregates in self-consolidating concrete", *Final Report, ICAR Project 108, Austin, TX*, 362 p.

Koehler, E. P. Fowler, D. W. (2007) "Mixture proportioning, testing, and early-age engineering properties of self-consolidating concrete for precast structural applications", *Center for Transportation Research, Austin, TX*, 24 p.

Kwan, A. K. H., Wong, H. H. C. (2008) "Packing density of cementitious materials: part 2 – packing and flow of OPC + PFA + CSF", *Materials and Structures*, vol. 41, p. 773-784.

Lafarge (2007) "Les superplastifiants : la magie du béton fluide", *Photothèque Lafarge*.

Lagier, F., Kurtis, K. E. (2007) "Influence of portland cement composition on early age reactions with metakaolin", *Cement and Concrete Research*, vol. 37, n° 10, p. 1411-1417.

Lam, L., Wong, Y. L., Poon C. S. (1998) "Effect of fly ash and silica fume on compressive and fracture behaviours of concrete", *Cement and Concrete Research*, vol. 28, n° 2, p. 271-283.

Langan, B. W., Weng, K., Ward, M. A. (2002) "Effect of silica fume and fly ash on heat of hydration of Portland cement", *Cement and Concrete Research*, vol. 32, n° 7, p. 1045-1051.

Lange, F., Mörtel, H. (1997) "Dense packing of cement pastes and resulting consequences on mortar properties", *Cement and concrete research*, vol. 27, n° 10, p. 1481-1488.

Leclerc, A. (2011) "Élaboration des protocoles d'essais, de consolidation et de formulation des bétons semi-autoplaçants pour le bâtiment", mémoire de maîtrise, Université de Sherbrooke, Canada, 180 p.

Lee, S. H., Kim, H. J., Sakai, E., Daimon, M. (2003) "Effect of particle size distribution of fly ash–cement system on the fluidity of cement pastes", *Cement and Concrete Research*, vol. 33, n° 5, p. 763-768.

Legrand, C. (1982) "La structure des suspensions de ciment", chapitre 6 dans le béton hydraulique, Presses de l'ENPC.

Li, Z., Ohkubo, T. -A., Tanigawa, Y. (2004) "Yield model of high fluidity concrete in fresh state", *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 16, n° 3, p. 195- 201.

Locker, F. W., Richartz, W., Sprung, S. (1976) "Setting of cement – Part I: Research and development of structure", *ZKG International*, vol. 29, n° 10, p. 435-442.

Ma, W., Sample, D., Martin, R., Brown, P. W. (1994) "Calorimetric study of cement blends containing fly ash, silica fume, and slag at elevated temperatures", *Cement and Concrete Aggregates*, vol. 16, n° 2, p. 93-99.

Mikanovic, N. Jolicoeur, C. (2008) "Influence of superplasticizers on the rheology and stability of limestone and cement pastes", *Cement and Concrete Research*, vol. 38, n° 7, p. 907-919.

Mikanovic, N. Rouis, F. Khayat, K. H. (2010) "Influence of supplementary cementitious materials and fillers on rheological properties, kinetics of cement hydration and mechanical properties of concrete equivalent mortar of SCC consistency", 6th International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete and 4th North American Conference on the Design and Use of SCC, Montreal, Canada, p. 381-394.

Mounanga, P., Irfan, M., Khokhar, A., El-Hachem, R., Loukili, A. (2011) "Improvement of the early-age reactivity of fly ash and blast furnace slag cementitious systems using limestone filler", *Materials and Structures*, vol. 44, n° 2, p. 437-453

Neville, M. A. (2000) "Propriétés des bétons", Éditions Eyrolles, Paris, 806 p.

Nielsson, I., Wallevik, O. H. (2003) "Rheological evaluation of some empirical test methods – Preliminary results", Proceedings of the 3rd RILEM International Symposium on Self-Compacting Concrete, Reykjavik, Islande, p. 59-68.

Okamura, H., Ouchi, M. (1999) "Self-compacting concrete development, present and future", RILEM Proceedings (PRO7), 1st International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, édition Skarendahl, Å. et Petersson, Ö., Stockholm, Suède, 804 p.

Omran, A. F., Naji, S., Khayat, K. H. (2011) "Portable vane test to assess structural buildup at rest of self-consolidating concrete", ACI Materials Journal, vol. 108, n° 6, p. 628-637.

Otis, N. (2000) "Influence de divers superplastifiants sur le ressuage et l'interface pâte-granulat dans les matériaux cimentaires", mémoire de maîtrise, Université de Sherbrooke, Canada, 110 p.

Outel, S. (2011) "Quantification par analyse d'images de la granulométrie des roches fragmentées : amélioration de l'extraction morphologique des surfaces, amélioration de la reconstruction stéréologique", thèse de doctorat, École des Mines de Paris, France, 235 p.

Ozawa, K., Maekawa, K., Kunishima, M., Okamura, H. (1989) "Development of high performance concrete based on the durability design of concrete structures", Proceedings of the 2nd East Asia and Pacific Conference on Structural Engineering and Construction, vol. 1, p. 445-450.

Paco, D. (2010) "Contribution à l'étude de l'influence des propriétés des fillers calcaires sur le comportement autoplaçant du béton", thèse de doctorat, Université de Toulouse, France, 253 p.

Palacios, M., Burgos-Montes, O., Rivilla, P., Torroja, F. P. E. (2012) "Compatibility between superplasticizer admixtures and cements with mineral additions", 10th International Conference on Superplasticizers and Other Chemical Admixtures in Concrete, Prague, République de Tchèque, p. 176-178.

Pan, J. (2011) "Influence des adjuvants chimiques sur la performance des mortiers de béton équivalent à rhéologie adaptée", mémoire de maîtrise, Université de Sherbrooke, Canada, 195 p.

Park, C. K., Noh, M. H., Park, T. H. (2005) "Rheological properties of cementitious materials containing mineral admixtures", Cement and Concrete Research, vol. 35, n° 5, p. 842-849.

Peleg, M. (1996) "Determination of the parameters of the Rosin-Rammler and beta distributions from their mode and variance using equation-solving software", Powder technology, vol. 87, n° 2, p. 181-184.

Plank, J., Schroeﬂ, C., Gruber, M., Lesti, M., Sieber, R. (2009) "Effectiveness of polycarboxylate superplasticizer in ultra-high strength concrete: the importance of PCE compatibility with silica fume", *Journal of Advanced Concrete Technology*, vol. 7, n° 1, p. 5-12.

Petit, J.-Y. (2005) "Effet de la température, des superplastifiants et des ajouts sur les variations rhéologique des micromortier et bétons auto-compactants", Thèse de doctorat, Université d'Artois, France, 249 p.

Petit, J.-Y., Khayat, K. H., Wirquin, E. (2006) "Coupled effect of time and temperature on variations of yield value of highly flowable mortar", *Cement and Concrete Research*, vol. 36, n° 5, p. 832-841.

Poon C. S., Lam, L., Kou, S. C., Wong, Y. L., Wong, R. (2001) "Rate of pozzolanic reaction of metakaolin in high performance cement pastes", *Cement and Concrete Research*, vol. 31, n° 9, p. 1301-1306.

Poon, C. S., Lam, L., Wong, Y. L. (1999) "Effects of fly ash and silica fume on interfacial porosity concrete", *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 11, n° 3, p. 197-205.

Pusica, S., Scekcic, V., Pusica, M. (2011) "Algorithms in "UniModBase" Information system for determine Rosin-Rammler and Gaudin-Shumann equations of particle size distribution using regression analysis", *Journal of Emerging Trends in Computing and Information Sciences*, vol. 2, n° 7, p. 332-343.

Ramachadran, V. S., Malhotra, V. M., Jolicoeur, C., Spiratos, N. (1998) "Superplasticizers: properties and applications in concrete", édition CANMET, Ottawa, 404 p.

Rassouly, S. M. K. (1999) "The packing density of 'perfect' binary mixtures", *Powder Technology*, vol. 103, n° 2, p. 145-150.

Regourd, M., Gautier, E. (1980) "Comportement des ciments soumis au durcissement accéléré". *Annales de l'Institut du Bâtiment et des Travaux Publics*, n° 387, p. 83-96

Rodger, S. A., Groves, G. W. (1988) "The microstructure of tricalcium silicate/pulverized-fuel ash blended cement pastes", *Advances in Cement Research*, vol. 1, n° 2, p. 84-91.

Rols, S., Ambroise, J., Péra, J. (1999) "Effects of different viscosity agents on the properties of self-leveling concrete", *Cement and Concrete Research*, vol. 29, n° 2, p. 261-266.

Roy, D. M., Idorn, G. M. (1982) "Hydration, structure, and properties of blast furnace slag cements, mortars, and concrete", *ACI Journal Proceedings*, vol. 79, n° 6, p. 444-457.

Sakai, E., Hoshimo, S., Ohba, Y., Daimon, M. (1997) "The fluidity of cement paste with various types of inorganic powders", *Proceedings of the 10th International Congress on the Chemistry of Cement*, Gothenburg, Suède, p. 19-26.

Sanchez de Rojas, M. I., Rivera, J., Frias, M. (1999) "Influence of microsilica state on pozzolanic reaction rate", *Cement and Concrete Research*, vol. 29, n° 6, p. 945-949.

Sandberg, P., Liberman, S. (2007) "Monitoring and evaluation of cement hydration by semi-adiabatic field calorimetry", *ACI Special Publication*, vol. 241, p. 13-24.

Saric-Coric, M. (2001) "Interactions superplastifiant-laitier dans les ciments au laitier. Propriétés du béton", thèse de doctorat, Université de Sherbrooke, Canada, 313 p.

Schindler, A. K., Folliard, K. J. (2005) "Heat of hydration models for cementitious materials", *ACI Materials Journal*, vol. 102, n° 1, p. 24-33.

Schober, I., Mäder, U. (2003) "Compatibility of Polycarboxylate superplasticizers with cements and cementitious blend", *Proceedings of the 7th CANMET/ACI International Conference on Superplasticizers and Other Chemical Admixtures in Concrete*, Berlin, Allemagne, p. 453-468.

Schutter, G. (2005) "Guidelines for testing fresh self-compacting concrete", *European Research Project: Measurement of Properties of Fresh Self-Compacting Concrete*, 23 p.

Schwartzentruber, A., Catherine, C. (2000), "La méthode du mortier de béton équivalent (MBE) - Un nouvel outil d'aide à la formulation des bétons adjuvantés", *Materials and Structures*, vol. 33, n°. 232, p. 475-482.

Sedran, T., de Larrard, F. (1994) "RENE-LCPC – Un logiciel pour optimiser la granularité des matériaux du génie civil", *Note technique, Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, N°194.

Sharman, J. (2013) "Mode d'action des agents viscosants dans les pâtes de ciment et les pâtes de carbonate de calcium", *Mémoire de maîtrise, Université de Sherbrooke, Canada*, 143 p.

Sioulas, B., Sanjayan, J. G. (2000) "Hydration temperatures in large high-strength concrete columns incorporating slag", *Cement and Concrete Research*, vol. 30, n° 11, p. 1791-1799.

Sonebi, M. (2006) "Rheological properties of grouts with viscosity modifying agents as diutan gum and welan gum incorporating pulverised fly ash", *Cement and concrete research*, vol. 36, n° 9, p. 1609-18.

Sotomayor Cruz, C. D. (2012) "Développement des bétons semi autoplaçants à rhéologie adaptée pour des infrastructures", mémoire de maîtrise, Université de Sherbrooke, Canada, 148 p.

Sprung, S., Kuhlmann, K., Ellerbrock, H. G. (1985) "Particle size distribution and properties of cement, Part II: water demand of portland cement", *ZKG International*, vol. 9, p. 275-281.

Suzuki, M., Sato, H., Hasegawa, M., Hirota, M. (2001) "Effect of size distribution on tapping properties of fine powder", *Powder Technology*, vol. 118, n° 1-2, p. 53-57.

Tagnit-Hamou, A. (2008) "GCI712 – Microstructure et physico-chimie des ciments et des bétons", Université de Sherbrooke, Canada.

TAM Air (2011) "TAM Air calorimeter, operator's manual", TA Instruments, 63 p.

Taylor, H. F. W. (1997) "Cement chemistry", Thomas Telford, 2^e édition, Londres, 480 p.

Taylor, H. F. W., Mohan, K., Moir, G. K. (1985) "Analytical study of pure and extended Portland cement pastes. II. Fly ash- and slag-cement pastes", *Journal of American Ceramic Society*, vol. 68, n° 12, p. 685-690.

Thomas, J. J., Jennings, H. M. Chen, J. J. (2009) "Influence of nucleation seeding on the hydration mechanisms of tricalcium silicate and cement", *The Journal of Physical Chemistry*, vol. 113, n° 11, p. 4327-4334.

Uchikawa, H., Hanehara, S., Sawaki, D. (1997) "The role of steric repulsive force in the dispersion of cement particles in fresh paste prepared with organic admixture", *Cement and Concrete Research*, vol. 27, n° 1, p. 37-50.

Utsi, S., Emborg, M., Carlswärd, J. (2003) "Relation between workability and rheological parameters", *Proceedings of the RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete*, PRO 33, Reykjavik, Islande, p. 154-164,

Velosa, A. L., Rocha, F., Veiga, R. (2009) "Influence of chemical and mineralogical composition of metakaolin on mortar characteristics", *Acta Geodynamica et Geomaterialia*, vol. 6, n° 1 (153), p. 121-126.

Vernet, C., Noworita, G. (1992) "Conductimetric test for cement - admixture systems", *Proceedings of 9th International Congress on the Chemistry of Cement*, New Delhi, Inde, vol. 4, p. 627-633.

Wallevik, J. E. (2003) "Rheology of particle suspension, fresh concrete, mortar and cement paste with various types of lignosulfonates", thèse de doctorat, The Norwegian University of Science and Thechnology, Trondheim, Norvège, 413 p.

Wan, H., Shui, Z., Lin, Z. (2004) "Analysis of geometric characteristics of GGBS particles and their influences on cement properties", *Cement and Concrete Research*, vol. 34, n° 1, p. 133-137.

Wang, A. Q., Zhang, C. (1997) "Study of the influence of the particle size distribution on the properties of cement", *Cement and Concrete Research*, vol. 27, n° 5, p. 685-695.

Wang, A. Q., Zhang, C., Zhang, N. (1999) "The theoretic analysis of the influence of the particle size distribution of cement system on the property of cement", *Cement and Concrete Research*, vol. 29, n° 11, p. 1721-1726.

Westerholm, M. (2006) "Rheology of the mortar phase of concrete with crushed aggregate", mémoire de licence, Luleå University of Technology, Suède, 185 p.

Wong, H. H. C., Kwan, A. K. H. (2008) "Packing density of cementitious materials: part 1 – measurement using a wet packing method", *Materials and Structures*, vol. 41, n° 4, p. 689-701.

Yamada, K., Takahashi, T., Hanehara, S., Matsuhisa, M. (2000) "Effects of the chemical structure on the properties of polycarboxylate-type superplasticizer", *Cement and Concrete Research*, vol. 30, n° 2, p. 197-207.

Yoshioka, K., Tazawa, E., Kawai, K., Enohata, T. (2002) "Adsorption characteristics of superplasticizers on cement components minerals", *Cement and Concrete Research*, vol. 32, n° 10, p. 1507-1513.

Yu, A. B., Bridgwater, J., Burbidge, A. (1997) "On the modelling of the packing of fine particles", *Powder Technology*, vol. 92, n° 3, p. 185-194.

Zhang, L., Glasser, F. P. (2002) "Hydration of calcium sulfoaluminate at less than 24 hours", *Advance in Cement Research*, vol. 14, n° 4, p. 141-165.

ANNEXE A (pour chapitre 4)

EFFET DE LA DATE DE LIVRAISON DU CIMENT SUR LES PROPRIÉTÉS RHÉOLOGIQUES DES MBE-AP

Durant la première année de cette étude, il y a avait eu plusieurs livraisons dans les matériaux (ciment, sable, granulats), résultant des changements au niveau de la production du ciment des caractéristiques des agrégats. Les différentes livraisons de ciment ont influencé la reproductibilité des BAP et des MBE-AP de référence. Des fluctuations ont été notées concernant les résultats de la demande en SP, la viscosité plastique et la stabilité des mélanges. Il était important de montrer les variations qui peuvent avoir lieu et d'essayer de prendre des mesures pour s'assurer que l'effet obtenu n'est pas lié à une nouvelle livraison des matériaux.

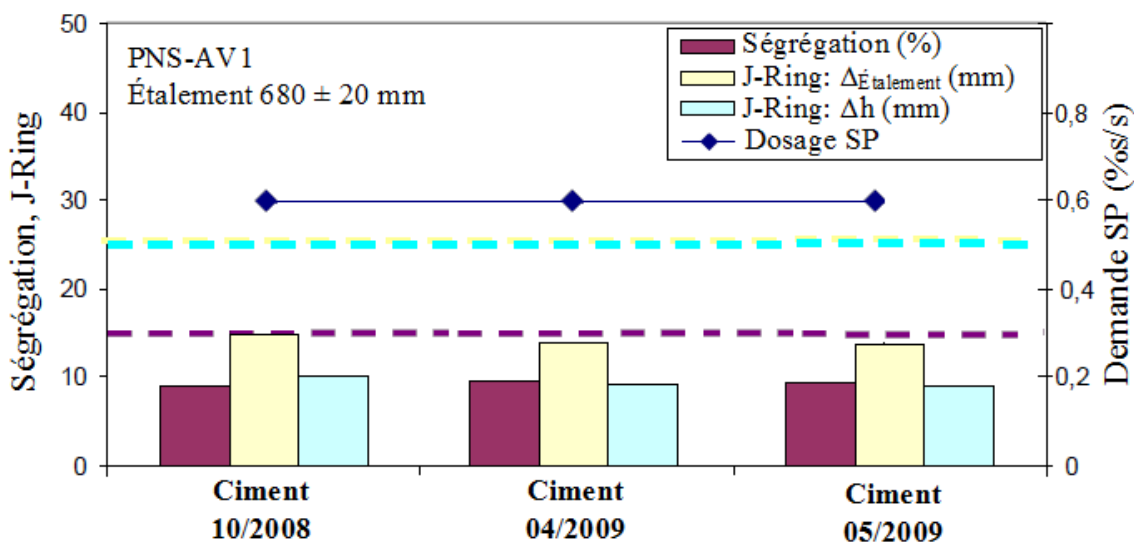


Figure A.1 Effet de la date de livraison du ciment sur les propriétés des BAP en présence de PNS-AV1

Les résultats de l'effet de trois différentes dates de livraison du ciment GU sur les propriétés des BAP-REF en présence de PNS-AV1 et PC-AV2, sont illustrés sur les figures A.1 et A.2, respectivement. L'étalement était maintenu constant 680 ± 20 mm. La capacité de passage de ces bétons a été évaluée par les deux mesures du J-Ring, Δ Étalement qui est la différence entre l'étalement sans et en présence de l'anneau et Δh qui est la moyenne de la différence de la

hauteur du béton à l'intérieur et juste à l'extérieur de l'anneau. Le pourcentage de ségrégation est obtenu par l'essai de la colonne de ségrégation.

Aucun effet significatif n'a été noté dans la capacité de passage et la ségrégation des BAP-REF1 en présence de la combinaison PNS-AV1. Par ailleurs, en présence de la combinaison PC-AV2 il apparaît clairement que la date de livraison du ciment entraîne des variations au niveau de la demande en SP, des résultats du J-ring ainsi que la stabilité du béton. Le pourcentage de ségrégation noté avec le ciment (04/2009) a été de deux fois, voir trois fois plus important que celui obtenu avec le ciment (10/2008).

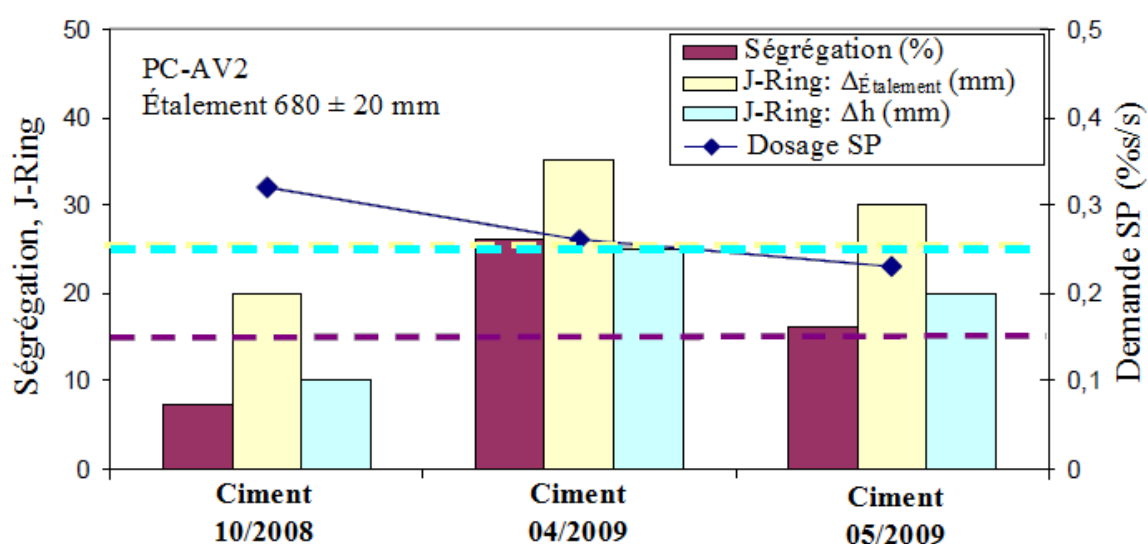


Figure A.2 Effet de la date de livraison du ciment sur les propriétés des BAP en présence de PC-AV2

De même, les résultats de l'effet de ces trois différentes dates de livraison du ciment GU sur la demande en SP et la viscosité plastique des MBE, en présence de PNS-AV1 et PC-AV2, sont illustrés sur les figures A.4 et A.5, respectivement. Pour les deux cas de combinaison SP-AV, l'étalement a été maintenu constant 260 ± 10 mm. En présence de la combinaison PNS-AV1, la date de livraison du ciment n'a pas eu d'effet sur la demande en PNS et des légères diminutions de μ_{pl} de 7% et 15% ont été notées avec les ciments des dates 04/2009 et 05/2009 par rapport à celui de la 10/2008. Tandis qu'en présence de la combinaison PC-AV2, une diminution importante allant jusqu'à 40% a été constaté dans la demande en PC et la μ_{pl} en comparaison avec le premier ciment utilisé.

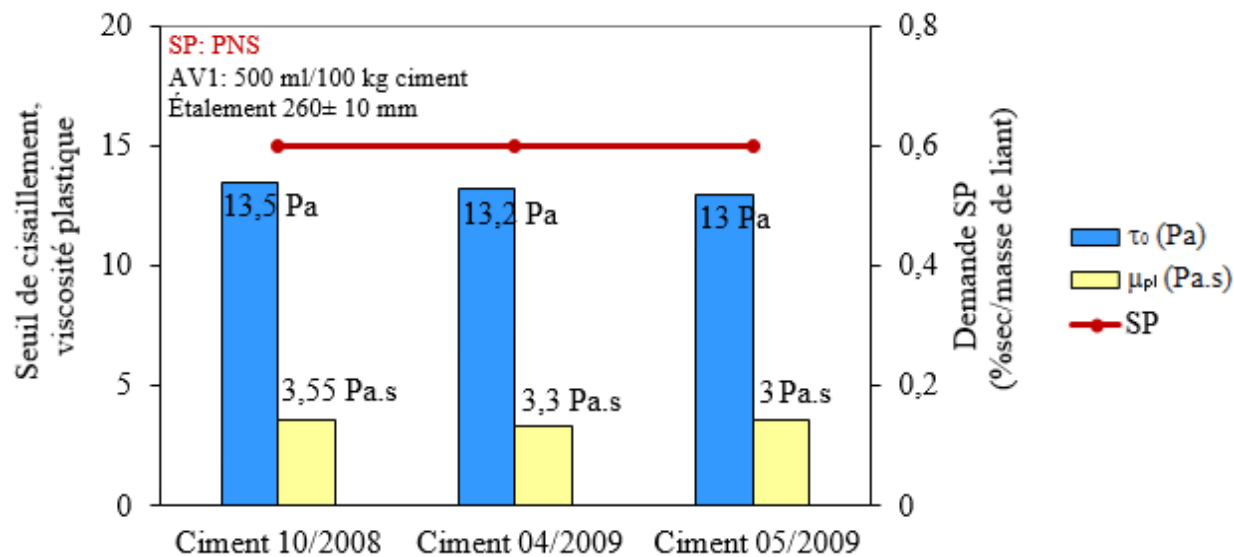


Figure A.3 Effet de la date de livraison du ciment sur la viscosité plastique et la demande en SP des MBE en présence de PNS-AV1

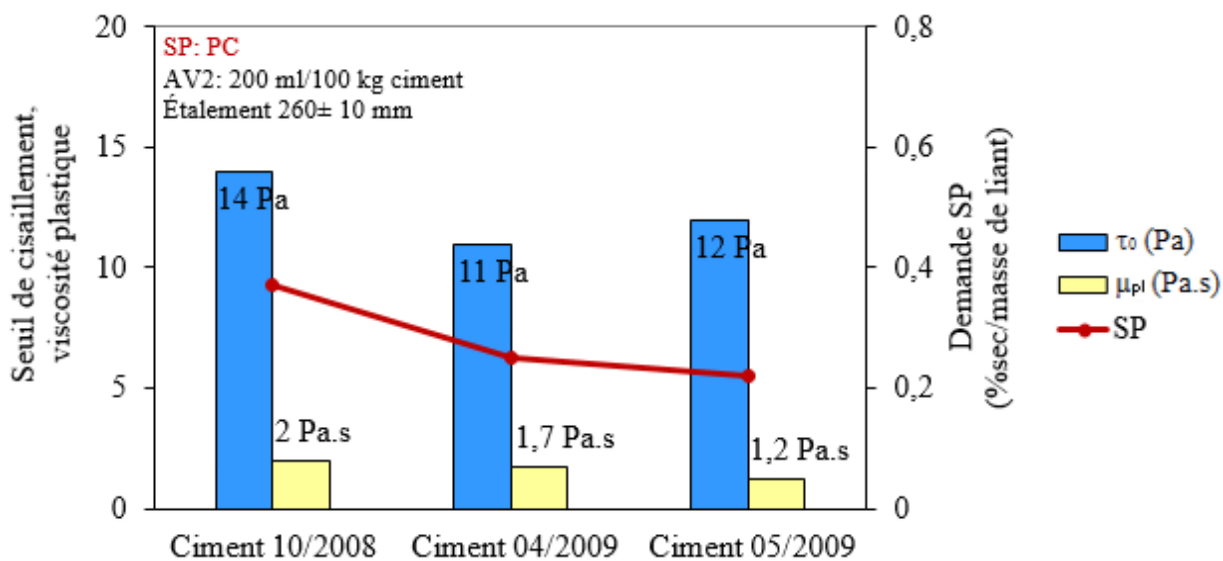


Figure A.4 Effet de la date de livraison du ciment sur la viscosité plastique et la demande en SP des MBE en présence de PC-AV2

La figure A.5 montre la chaleur d'hydratation des MBE en présence de la combinaison PC-AV2. Il paraît bien que durant les premières heures d'hydratation, le ciment 05/2009 dégage moins de chaleur que les deux premiers ciments. En effet, le 2^{ème} pic d'hydratation du ciment

05/2009 est moins intense de 10% en comparaison avec les deux premiers ciments et le 3^{ème} pic d'hydratation apparaît plus tard sous forme d'une très légère bosse.

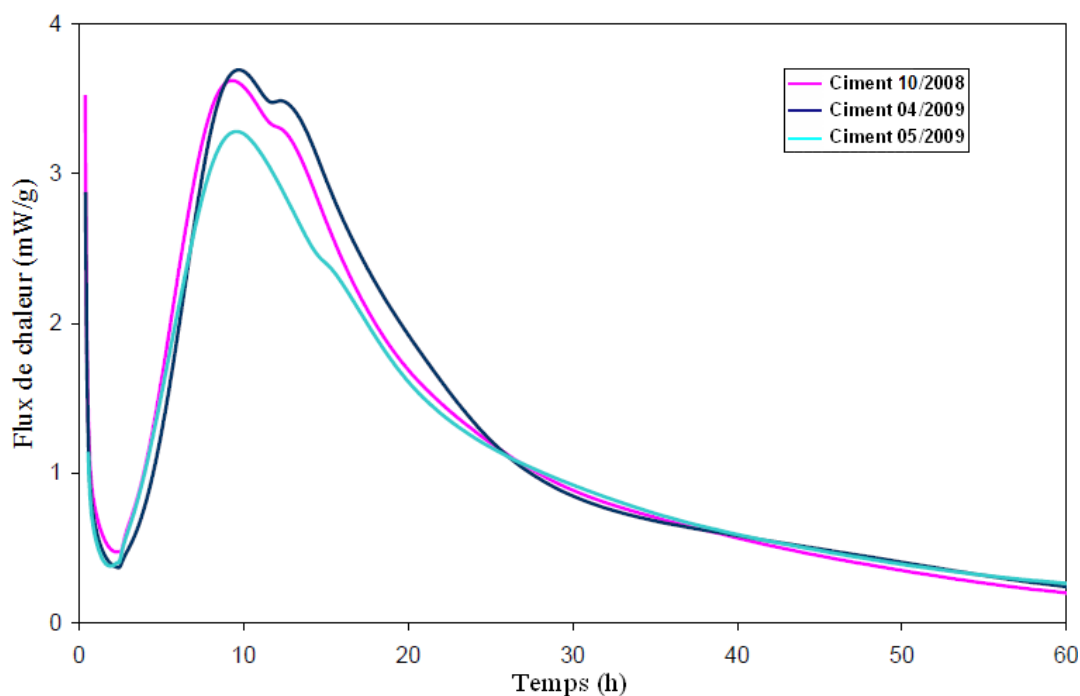


Figure A.5 Effet de la date de livraison du ciment sur les la chaleur d'hydratation des MBE en présence de PC-AV2

Une analyse thermographique a été effectuée sur les trois ciments afin d'observer les pertes de masse qui peuvent avoir lieu dans des intervalles de températures particuliers. Les échantillons sont chauffés de 50 à 950°C, à une vitesse de balayage de 10°C/min et sous un courant d'azote de 50 ml/min. les résultats montrent que les ciments 10/2008 et 04/2009 ont eu des pertes de masse importantes entre 50°C et 200°C, correspondant à la déshydratation des sulfates de calcium, en comparaison avec le ciment 05/2009. Ceci signifie que les deux premiers ciments contiennent surtout du gypse, alors que le dernier ciment peut contenir de l'hémihydrate (Figure A.6). Par contre, la perte de masse entre 200°C et 500°C est attribuée à la déshydratation de la portlandite. Les deux premiers ciments contiennent beaucoup de portlandite que le dernier ce qui se traduit par une perte de masse 3 fois plus importante en comparaison avec le ciment 05/2009 (Tableau A.1). Ceci peut indiquer que l'entreposage du ciment n'était pas vraiment approprié, ce qui a favorisé la pré-hydratation du ciment.

La perte de masse entre 500°C et 850°C est attribuée à la décarbonatation du calcaire. Le Ciment 05/2009 contient beaucoup plus de calcaire en comparaison avec les deux premiers ciments, il s'agit de 30% plus que le premier ciment ce peut résulter à des fluctuations au niveau de la demande en SP et la μ_{pl} surtout en présence de PC. En effet, le calcaire en présence de PC-AV2 augmente significativement la fluidité en diminuant aussi la viscosité plastique des MBE-AP (résultats du chapitre 5).

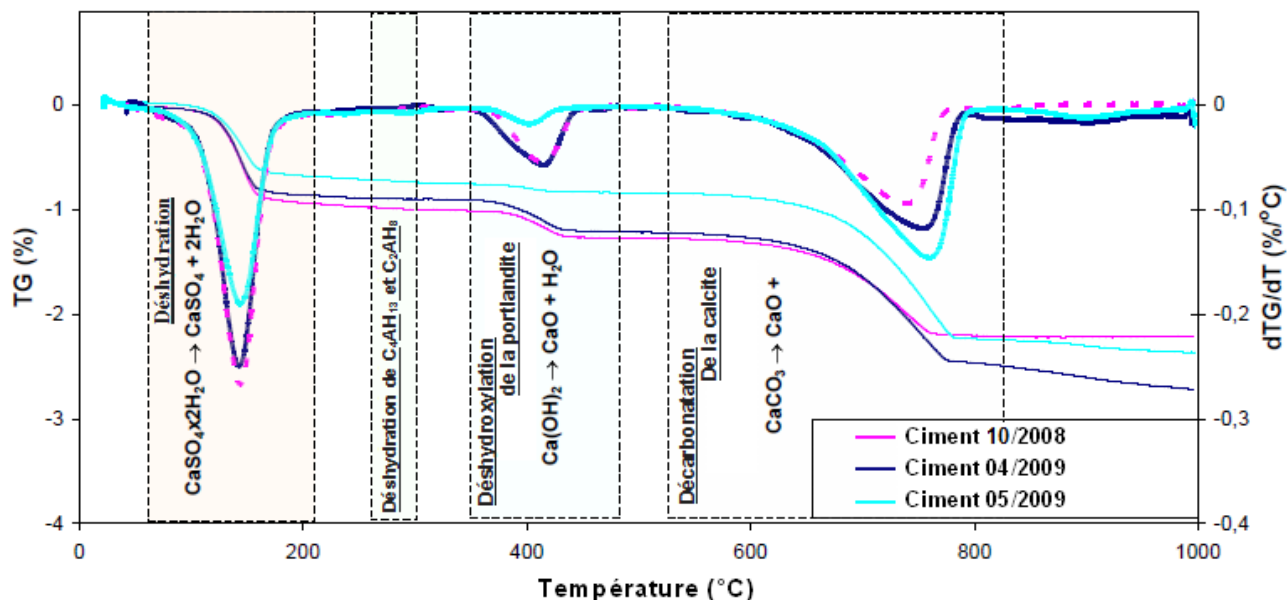


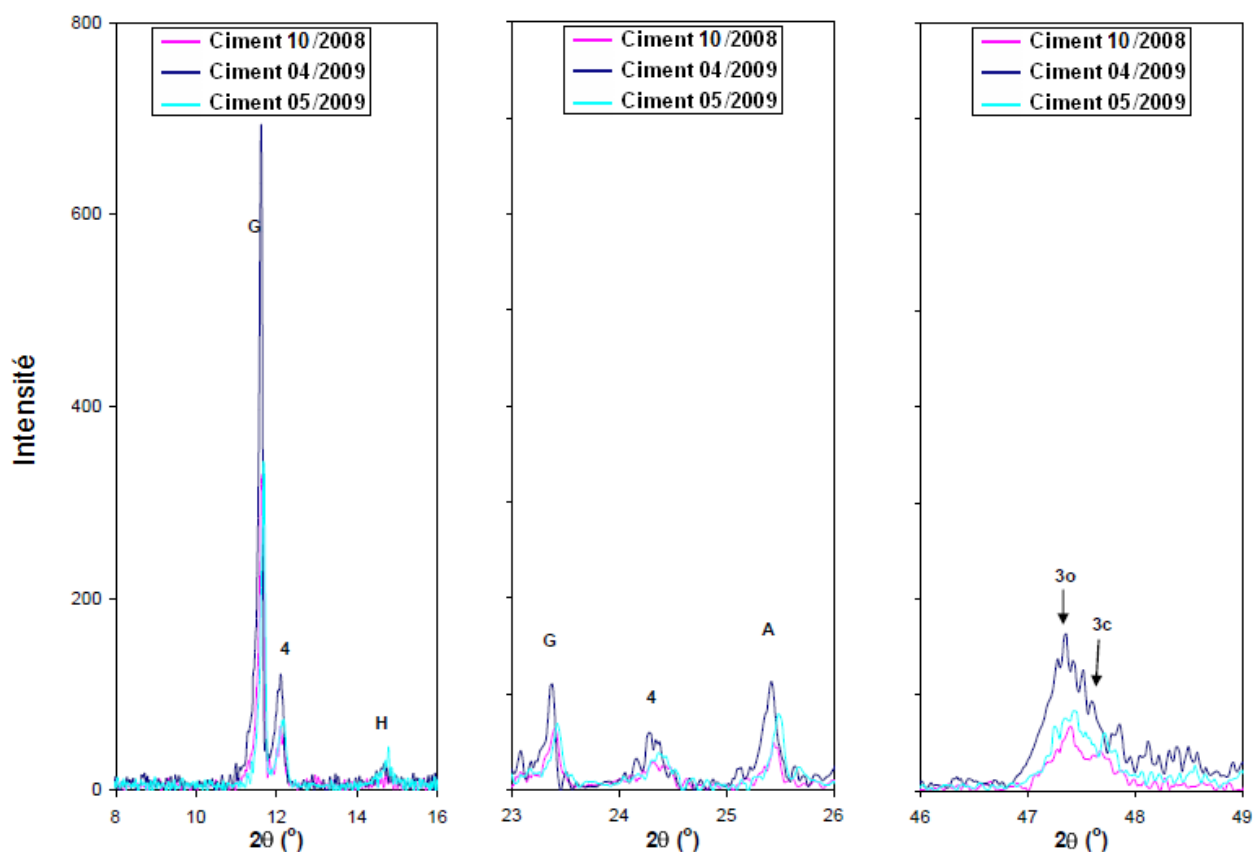
Figure A.6 Analyse thermographique des trois ciments

Tableau A.1 Perte de masse lors de l'analyse thermographique

Intervalle de température (°C)	Perte de masse (%)			Attribution
	Ciment 10/2008	Ciment 04/2009	Ciment 05/2009	
50 – 200	0,93	0,88	0,78	Gypse
350 – 500	0,26	0,25	0,08	Portlandite
500 - 850	0,95	1,15	1,42	Calcite

Les spectres DRX des trois ciments sont présentés sur la figure A.7. Il a été noté que le ciment 04/2009 se caractérise par une présence importante de gypse et de C_4AF en comparaison avec les deux autres. De plus, le C_3A présent dans ce ciment est un mélange de C_3A orthorhombique et cubique. Les sulfates de calcium du ciment 05/2009 sont un mélange de gypse, d'hémihydrate et d'anhydride ce qui se concorde bien avec les résultats de l'analyse

thermographique. Comme l'hémihydrate possède une solubilité plus importante que le gypse, ceci empêche les molécules de SP d'interférer avec l'hydratation des aluminates.



G : Gypse, A: anhydrite, H : hemihydrate, 4 : C₄AF, 3O: C₃A orthorhombique, 3C: C₃A cubique

Figure A.7 Le spectre DRX des trois ciments

Commentaires

- Les MBE-AP et les BAP contenant un SP à base de PNS sont plus robuste, vis-à-vis les petits variations dans la production du ciment, que ceux contenant SP à base du PC utilisé. Ceci a été bien traduit par des variations limitées au niveau des résultats (demande en SP et viscosité plastique) qui ne dépassent pas 15% en comparaison avec des fluctuations allant jusqu'à 40% en présence de PC.
- Les propriétés rhéologiques sont plus affectées que les propriétés mécaniques par les petits changements des propriétés des matériaux utilisés.

- Un ciment de même origine, peut différer d'une livraison à une autre en terme de : propriétés physique, composition chimique (les aluminates et les sulfates de calcium) et le degré de pré-hydratation.